

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Josip Bilandžija

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:
Doc. dr. sc. Ivica Garašić

Student:
Josip Bilandžija

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru, doc.dr.sc. Ivici Garašiću na ukazanom povjerenju, strpljenju i kvalitetnim savjetima tijekom izrade diplomskog rada.

Zahvaljujem se asistentici dr.sc. Maji Jurici na pomoći i velikom strpljenju tijekom izrade diplomskog rada.

Također se zahvaljujem tehničkom osoblju Laboratorija za zavarene konstrukcije jer su mi omogućili izvođenje eksperimentalnog dijela rada.

Posebno se zahvaljujem obitelji i djevojci na podršci i strpljenju tijekom izrade diplomskog rada kao i tokom studija.

Josip Bilandžija



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

JOSIP BILANDŽIJA

Mat. Br.: **0035182214**

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**ZNAČAJKE MODERNIH IZVORA STRUJE ZA MAG
ZAVARIVANJE**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**CHARACTERISTICS OF MODERN POWER SOURCES FOR MAG
WELDING**

Opis zadatka:

Prikazati osnovne koncepte izvora struje za MAG zavarivanje i opisati najčešće modificirane inačice prijenosa metala u električnom luku. Definirati mogućnosti izbora ulaznih parametara u odnosu na vrstu materijala i zaštitnog plina kao i regulacije stabilnosti električnog luka. Opisati specifične značajke koje eliminiraju utjecaj slobodnog kraja žice. Navesti primjere primjene modificiranih inačica prijenosa metala za različite vrste konstrukcija i osnovnih materijala.

U eksperimentalnom dijelu na odgovarajućem izvoru struje za MAG zavarivanje novije generacije analizirati mogućnosti podešavanja parametara primjenom sinergijske upravljačke karakteristike. Za prikladnu kombinaciju materijala i plina snimanjem dinamičke karakteristike kvantificirati utjecaj pojedinih funkcija. Odrediti utjecaj na geometriju zavara i stabilnost prijenosa metala u električnom luku. Na temelju provedenih istraživanja ocijeniti stupanj primjenjivosti specifičnih značajki modernih izvora struje u realnim proizvodnim uvjetima.

Zadatak zadan:

5. svibnja 2016.

Rok predaje rada:

7. srpnja 2016.


Predviđeni datum obrane:

13., 14. i 15. srpnja 2016.

Zadatak zadan:


Doc. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Franjo Čajner

SADRŽAJ:

SADRŽAJ:	I
POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA.....	VII
POPIS KRATICA	VIII
POPIS OZNAKA	IX
SAŽETAK.....	X
SUMMARY	XI
1. UVOD	1
2. MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA.....	2
2.1. Parametri MAG zavarivanja.....	3
2.1.1. Struja zavarivanja	3
2.1.2. Napon	4
2.1.3. Brzina zavarivanja.....	5
2.1.4. Slobodni kraj žice.....	5
2.1.5. Induktivitet	6
2.1.6. Protok zaštitnog plina.....	7
2.2. Načini prijenosa metala u električnom luku.....	8
2.2.1. Prijenos metala kratkim spojevima	8
2.2.2. Prijenos metala prijelaznim lukom.....	9
2.2.3. Prijenos metala štrcajućim lukom	10
2.2.4. Prijenos metala impulsnim lukom.....	11
2.2.5. Rotirajući luk.....	13
3. IZVORI STRUJE ZA MAG ZAVARIVANJE.....	15
3.1. Inverterski izvori struje za MAG zavarivanje	15
3.1.1. Podešavanje parametara MAG zavarivanja	17
3.1.1.1. Sinergijske krivulje	17
3.1.2. Specifične funkcije inverterskih izvora struje za MAG zavarivanje.....	18
3.1.2.1. WiseThin™	18

3.1.2.2. WiseFusion™	19
3.1.2.3. WiseRoot™	20
3.1.2.4. WisePenetration™	21
3.1.2.5. Waveform Control Technology™	23
3.1.2.6. LSC-Low Spatter Control	24
3.1.2.7. PMC-Pulse Multi Control	26
4. MODIFICIRANI NAČINI PRIJENOSA METALA U ELEKTRIČNOM LUKU	28
4.1. Modificirani prijenos metala kratkim spojevima	28
4.1.1. STT-Surface Tension Transfer®	28
4.1.2. CMT-Cold Metal Transfer®	31
4.1.3. FastROOT®	32
4.1.4. CBT- Controlled bridge transfer®	32
4.2. Modificirani prijenos metala štrcajućim lukom	34
4.2.1. RMT-Rapid MAG Technology®	34
4.2.2. ForceArc®	35
4.2.3. PowerMode®	36
5. EKSPERIMENTALNI DIO	38
5.1. Plan eksperimenta	38
5.1.1. Izvor struje za zavarivanje-OTC Daihen Welbee P500L	39
5.1.1.1. Mogućnosti podešavanja parametara primjenom sinergijske upravljačke karakteristike	41
5.1.2. Oprema za snimanje dinamičke karakteristike	45
5.1.2.1. Dinamička karakteristika	46
5.1.3. Ostala oprema	48
5.2. Eksperiment	49
5.2.1. Osnovni materijal	49
5.2.2. Zaštitni plin	50
5.2.3. Dodatni materijal	50
5.2.4. Postupak pripreme uzoraka za analizu makroizbrusaka	52
5.2.4.1. Brušenje uzoraka	52
5.2.4.2. Nagrizanje	53
5.3. Analiza funkcije Arc control	54
5.4. Analiza funkcije Constant penetration	62

5.5. Analiza funkcije Low spatter	70
6. ZAKLJUČAK	74
7. LITERATURA.....	76
8. PRILOZI.....	79

POPIS SLIKA

Slika 1. Sustav za MAG zavarivanje [2]	2
Slika 2. Ovisnost jakosti struje zavarivanja o promjeru žice i brzini dovođenja žice [1]	4
Slika 3. Ravna karakteristika izvora struje za MAG zavarivanje [1]	5
Slika 4. Podešavanje uzlazne i silazne struje kratkog spoja pomoću induktiviteta [3]	7
Slika 5. Jedan ciklus prijenosa metala kratkim spojevima [1]	8
Slika 6. Shematski prikaz prijenosa metala prijelaznim lukom [1]	10
Slika 7. Shematski prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom [1]	11
Slika 8. Ciklus prijenosa metala impulsnim lukom [1]	12
Slika 9. Shematski prikaz prijenosa metala štrcajućim i rotirajućim lukom [8]	14
Slika 10. Izgled profila zavara rotirajućeg luka u usporedbi s štrcajućim lukom [8]	14
Slika 11. Blok dijagram inverterskog izvora struje za zavarivanje [3]	16
Slika 12. Proizvod zavaren uz pomoć funkcije WiseThin™ [15]	19
Slika 13. Prikaz WiseRoot™ načina prijenosa i klasičnog prijenosa kratkim spojevima [15]	20
Slika 14. Penetracija u ovisnosti o slobodnom kraju žice kod konvencionalnog MAG zavarivanja i funkcije WiseRoot™ [15]	22
Slika 15. Klasična postava Waveform Control Technology™ [4]	23
Slika 16. Ciklus prijenosa metala kratkim spojevima [16]	24
Slika 17. LSC prijenos metala kratkim spojevima [16]	25
Slika 18. Prijenos metala kratkim spojevima uz stabilizator penetracije [16]	26
Slika 19. Prijenos metala kratkim spojevima bez stabilizatora penetracije [16]	26
Slika 20. Strujna karakteristika STT postupka zavarivanja [19]	30
Slika 21. Faze CMT postupka zavarivanja [22]	31
Slika 22. Princip CBT postupka zavarivanja [2]	33
Slika 23. Faze EWM forceArc postupka [26]	36
Slika 24. Prikaz ravne, strmopadajuće i karakteristike PowerMode postupka [28]	37
Slika 25. Radno mjesto u Laboratoriju za zavarivanje, FSB, Zagreb	39

Slika 26. Izvor struje OTC Daihen Welbee P500L	40
Slika 27. Sučelje za podešavanje načina rada i parametara na izvoru struje OTC Daihen Welbee P500L	41
Slika 28. Parametri zavarivanja za konstrukcijski čelik.....	42
Slika 29. Parametri zavarivanja pri zavarivanju nehrđajućeg čelika.....	43
Slika 30. Parametri zavarivanja pri zavarivanju feritnog nehrđajućeg čelika.....	43
Slika 31. Parametri zavarivanja pri zavarivanju nehrđajućeg čelika praškom punjenom žicom	44
Slika 32. Osciloskop Tektronix TDS 210 i računalo s programom Wavestar™	45
Slika 33. Shema spajanja mjerne opreme [2]	46
Slika 34. Oscilogram dinamičke karakteristike $u_i = f(t)$, MAG postupka zavarivanja.....	47
Slika 35. Modularni sustav pogona MDS-1002	48
Slika 36. Specifikacija dodatnog materijala [33]	51
Slika 37. Automatska polirka Buehler	53
Slika 38. Navari dobiveni primjenom funkcije Arc control.....	55
Slika 39. Oscilogram dinamičke karakteristike $u_i = f(t)$, pri MAG zavarivanju bez uključene funkcije Arc control	57
Slika 40. Oscilogram dinamičke karakteristike $u_i = f(t)$, pri MAG zavarivanju uz uključenu funkciju Arc control i postavljenu vrijednost -10	58
Slika 41. Oscilogram dinamičke karakteristike $u_i = f(t)$, pri MAG zavarivanju uz uključenu funkciju Arc control i postavljenu vrijednost +10	59
Slika 42. Ovisnost brzine porasta struje o vrijednosti funkcije Arc control.....	60
Slika 43. Makroizbrusak navara 3, 4 i 5.....	61
Slika 44. Navari 1 i 2 dobiveni pri snimanju dinamičkih karakteristika funkcije Constant penetration	63
Slika 45. Navari 6 i 7 dobiveni pri snimanju dinamičkih karakteristika funkcije Constant penetration.....	64
Slika 46. Oscilogram dinamičke karakteristike $u_i = f(t)$, pri MAG zavarivanju uz uključenu funkciju Constant penetration uz slobodni kraj žice od 15 mm	65

Slika 47. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i = f(t)$, pri MAG zavarivanju uz isključenu funkciju Constant penetration uz slobodni kraj žice od 30 mm	66
Slika 48. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i = f(t)$, pri MAG zavarivanju uz uključenu funkciju Constant penetration uz slobodni kraj žice od 30 mm	67
Slika 49. Makroizbrusak navara 1 i 2.....	68
Slika 50. Makroizbrusak navara 6 i 7.....	68
Slika 51. Ovisnost dubine penetracije o iznosu slobodnog kraja žice	69
Slika 52. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i = f(t)$, pri CBT prijenosu metala pri jakosti struje zavarivanja od 150 A.....	71
Slika 53. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i = f(t)$, pri konvencionalnom MAG zavarivanju pri jakosti struje zavarivanja od 220 A	72
Slika 54. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i = f(t)$, pri CBT prijenosu metala pri jakosti struje zavarivanja od 220 A.....	73

POPIS TABLICA

Tablica 1. Karakteristične vrijednosti slobodnog kraja žice [1].....	6
Tablica 2. Faze WiseRoot™ i klasičnog prijenosa metala kratkim spojevima [15]	21
Tablica 3. Specifikacija izvora struje OTC Daihen Welbee P500L [29]	40
Tablica 4. Kemijski sastav čelika S235 [32]	49
Tablica 5. Mehanička svojstva čelika S235 za debljinu 10 mm [32].....	50
Tablica 6. Parametri zavarivanja pri snimanju dinamičkih karakteristika funkcije Arc control	55
Tablica 7. Izmjerene vrijednosti profila navara 3, 4 i 5	61
Tablica 8. Parametri zavarivanja pri snimanju dinamičkih karakteristika funkcije Constant penetration	62
Tablica 9. Izmjerene vrijednosti profila navara 1, 2, 6 i 7	69
Tablica 10. Parametri zavarivanja pri snimanju dinamičkih karakteristika funkcije Low spatter	70

POPIS KRATICA

Kratika	Opis kratice
MAG	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina.
IGBT	Bipolarni tranzistor s izoliranom upravljačkom elektrodom.
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje.
MIG	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina.
TIG	Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina.
EPP	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom pod zaštitom praška.
STT	Prijenos metala površinskom napetošću.
CMT	Prijenos metala kratkim spojevima uz vrlo mali unos topline.
CBT	Modificirani MAG postupak koji kombinira prednosti impulsnog i klasičnog zavarivanja.
RMT	Modificirani MAG postupak zavarivanja štrcajućim lukom.
CV	Ravna strujna karakteristika (eng. Constant voltage characteristic)
LED	Svijetleća dioda

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Naziv
f	Hz	Frekvencija
I	A	Jakost struje
U	V	Napon
t	s	Vrijeme
v _ž	m/min	Brzina dodavanja žice

SAŽETAK

U teoretskom dijelu rada ukratko je opisan MAG postupak zavarivanja, parametri MAG zavarivanja i konvencionalni načini prijenosa metala u električnom luku. Poseban naglasak stavljen je na moderne, inverterske izvore struje za zavarivanje, mogućnosti podešavanja parametara te specifične funkcije koje posjeduju. Također su opisane i objašnjene modificirane inačice prijenosa metala u električnom luku, njihove mogućnosti i područja primjene te modificirani postupci MAG zavarivanja kojima su one temelj.

U eksperimentalnom dijelu rada, koji je izveden u Laboratoriju za zavarivanje, Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu, analizirana je mogućnost podešavanja parametara primjenom sinergijske upravljačke karakteristike na izvoru struje za MAG zavarivanje novije generacije. Također, analizirane su funkcije izvora struje za zavarivanje i kvantificiran njihov utjecaj na stabilnost prijenosa metala u električnom luku i geometriju zavara na osnovi snimljenih dinamičkih karakteristika.

Ključne riječi: MAG, prijenosa metala u električnom luku, inverterski izvori struje, dinamička karakteristika.

SUMMARY

In the theoretical part of this work MAG welding procedure, MAG welding parameters and conventional modes of metal transfer are briefly described. Special emphasis is placed on modern, inverter power sources, setup of parameters and their specific functions. Also modified modes of metal transfer are described, their possibilities and scope of application. Modified MAG welding procedures, which are based on modified modes of metal transfer, are also described.

In experimental part of this work, which was performed in Laboratory for welding, Faculty of mechanical engineering and naval architecture, University of Zagreb, possibilities of parameters setup on newer generation MAG welding power sources were analyzed. Also functions of welding power sources were analyzed and their impact on the stability of the metal transfer in arc and weld geometry was quantified through recorded dynamic characteristics.

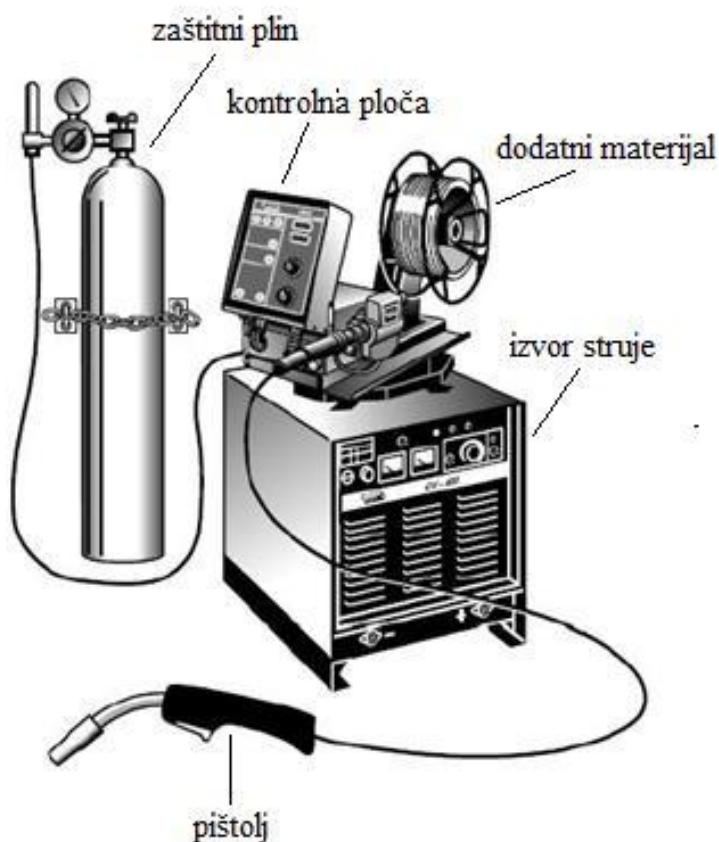
Key words: MAG, modes of metal transfer, inverter power sources, dynamic characteristic.

1. UVOD

Zavarivanje kao tehnologija spajanja materijala je jedna od najzastupljenijih tehnologija u industriji. Zahtjevi za kvalitetom zavarenih spojeva, ekonomičnosti i produktivnosti doveli su do razvoja brojnih postupaka zavarivanja. MAG-elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina (oznaka 135 prema normi *HRN EN ISO 4063:2012 Zavarivanje i srodni postupci-Nomenklatura postupaka i referentni brojevi*) je najzastupljeniji postupak spajanja metala u današnje vrijeme. Ovaj postupak karakterizira velika fleksibilnost u smislu: materijala koji se mogu zavarivati, debljina osnovnog materijala, načina prijenosa metala u električnom luku, izbora parametara te mogućnosti automatizacije i robotizacije. Za zaštitu električnog luka i rastaljenog metala te omogućavanje uspostave električnog luka koristi se aktivni plin CO₂ ili neka od njegovih mješavina s argonom, helijem i kisikom. Žica koja je ujedno elektroda i dodatni materijal spojena je na „+“ pol istosmjerne struje. Razvoj industrije i sve veći zahtjevi za kvalitetom zavarenih spojeva te težnja što većoj produktivnosti, stabilnosti prijenosa metala u električnom luku i povećanja penetracije uzrokuju ubrzani razvoj na području MAG zavarivanja. Posljedica toga je razvoj modernih izvora struje za zavarivanje i modificiranih postupaka MAG zavarivanja (prvenstveno modificiranje načina prijenosa metala u električnom luku). U ovom radu bit će objašnjene osnove konvencionalnog MAG zavarivanja (parametri i načini prijenosa metala u električnom luku), koncepti modernih izvora struje za MAG zavarivanje (prvenstveno inventerskih) te osnovne i specifične funkcije koje posjeduju, a koje služe za regulaciju stabilnosti prijenosa metala u električnom luku, povećanje produktivnosti i penetracije. Također biti će opisani modificirani načini prijenosa metala u električnom luku te njihovo područje primjene.

2. MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA

MAG postupak zavarivanja je elektrolučni postupak zavarivanja taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina (oznaka 135 prema normi *HRN EN ISO 4063:2012 Zavarivanje i srodni postupci-Nomenklatura postupaka i referentni brojevi*). Kao aktivni plin za MAG zavarivanje koristi se CO₂ ili njegova mješavina s argonom, helijem ili kisikom. Zaštitni plin ima ulogu ionizacije vodljivog prostora za održavanje električnog luka te zaštite električnog luka i rastaljenog metala od utjecaja okoline. Zaštitni plin utječe na način prijenosa metala u električnom luku, metalurške procese u talini i parametre zavarivanja. Električni luk održava se između kontinuirano dobavljane žice koja je ujedno dodatni materijal i elektroda spojena na „+“ pol istosmjernog izvora struje te radnog komada. Sustav za MAG zavarivanje sastoji se od: izvora struje, dodavača žice, polikabela i hladnjaka, spremnika sa zaštitnim plinom pod tlakom i kontrolne jedinice (Slika 1.)



Slika 1. Sustav za MAG zavarivanje [2]

Prednosti MAG postupka su: mogućnost zavarivanja svih vrsta materijala, širok raspon parametara i načina prijenosa metala, zavarivanje u svim položajima, zavarivanje u radionici i na terenu, mogućnost primjene raznih plinskih mješavina, mogućnost primjene praškom punjene žice, širok raspon debljina materijala, velika učinkovitost i proizvodnost, moguća primjena i za lemljenje, pogodnost za automatizaciju i robotizaciju. Nedostaci MAG zavarivanja su: otežana zaštita plinskom atmosferom na terenu, mogući problemi kod dovođenja žice, veći broj grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja i štrcanje kod zavarivanja kratkim spojevima. [1,2]

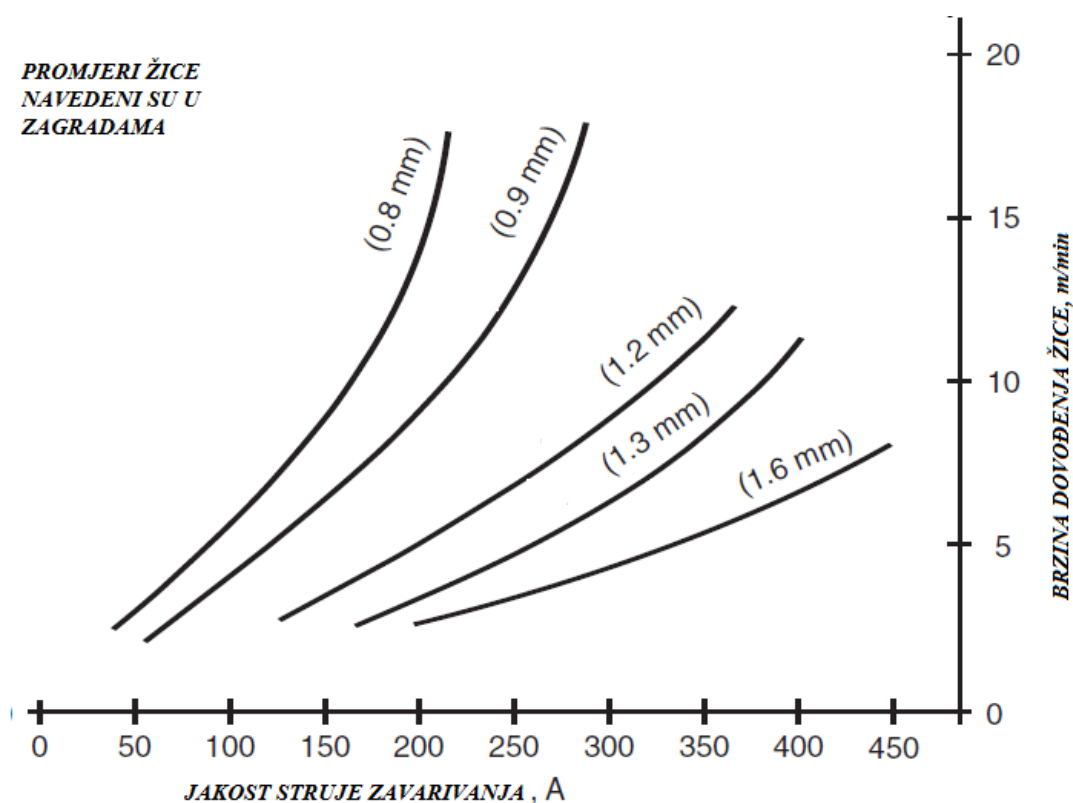
Upravo zbog navedenih nedostataka te zahtjeva da se poboljša produktivnost i stabilnost postupka nastoji se poboljšati MAG postupak zavarivanja što se postiže poboljšanjem izvora struje za zavarivanje te modificiranjem konvencionalnog MAG postupka što se najčešće postiže preko modificiranja načina prijenosa metala u električnom luku.

2.1. Parametri MAG zavarivanja

Parametri MAG zavarivanja su najutjecajniji čimbenik o kojem ovisi kvaliteta dobivenog zavarenog spoja. Na kvalitetu zavarenog spoja kod MAG zavarivanja najviše utječu: jakost struje zavarivanja, brzina zavarivanja, slobodni kraj žice, napon, induktivitet i protok zaštitnog plina. Podešavanjem ovih parametara regulira se način prijenosa metala u električnom luku što direktno utječe na kvalitetu zavarenog spoja. [1]

2.1.1. Struja zavarivanja

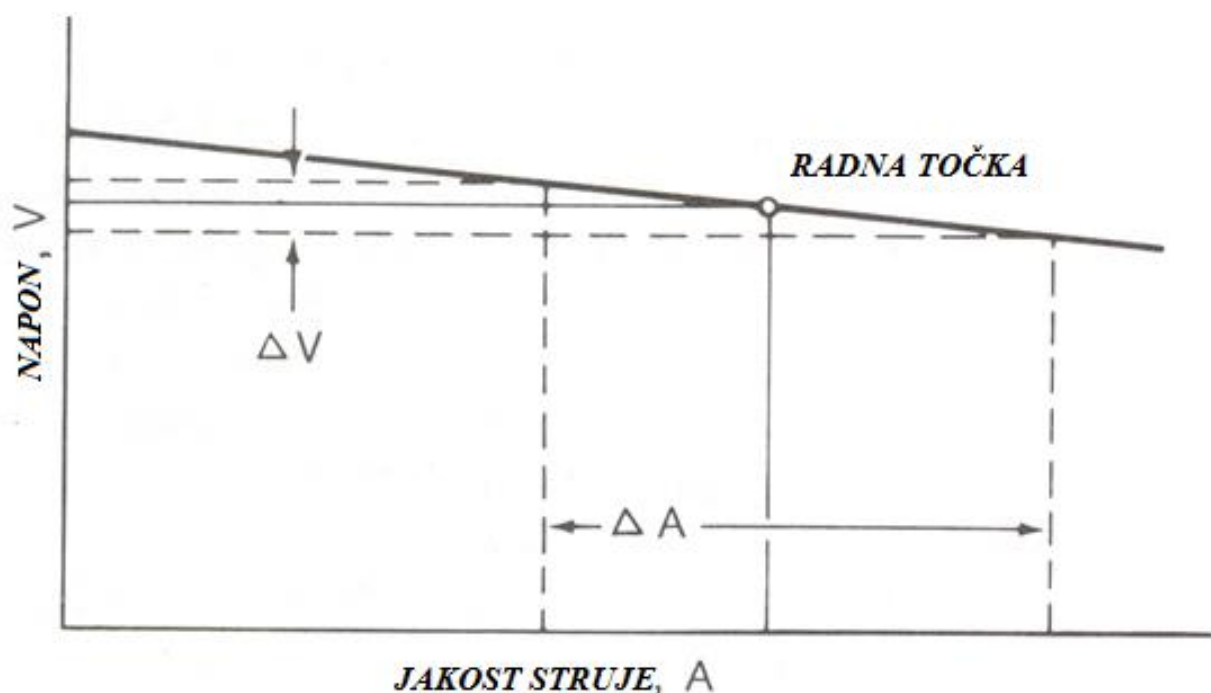
Struja zavarivanja je jedan od glavnih parametara koji utječe na način prijenosa metala u električnom luku. O struji zavarivanja ovise: stabilnost luka, penetracija, količina taline te brzina zavarivanja. Jakost struje zavarivanja ovisi o promjeru žice, položaju zavarivanja te debljini i vrsti materijala. Na Slici 2. prikazana je ovisnost jakosti struje zavarivanja o promjeru žice te brzini dovođenja žice. [1]



Slika 2. Ovisnost jakosti struje zavarivanja o promjeru žice i brzini dovođenja žice [1]

2.1.2. Napon

O naponu zavarivanja ovisi: način prijenosa metala u električnom luku, stabilnost električnog luka te njegova duljina i širina. Duljina električnog luka proporcionalna je naponu. Dulji električni luk zahtjeva veći napon što rezultira širim zavarom i manjom penetracijom. Moderni izvori struje za MAG zavarivanje reguliraju odnos napona i jakosti struje na temelju ravne karakteristike (Slika 3.) te se pri unosu parametara za MAG zavarivanje najčešće podešava jedan od tih parametara. Najčešće se unosi struja zavarivanja ili brzina dovođenja žice, a onda se napon automatski podešava, preko sinergijskih krivulja. [1]



Slika 3. Ravna karakteristika izvora struje za MAG zavarivanje [1]

2.1.3. Brzina zavarivanja

Brzina zavarivanja je faktor koji direktno utječe na produktivnost postupka zavarivanja. Brzina zavarivanja se podešava u skladu s položajem zavarivanja i jakosti struje zavarivanja. Promjena brzine zavarivanja utječe na izgled profila zavora kao i na njegova mehanička svojstva. Povećanjem brzine zavarivanja profil zavora se sužava i penetracija opada, dok smanjenjem brzine zavarivanja zavar postaje širi i penetracija dublja. [1]

2.1.4. Slobodni kraj žice

Slobodni kraj žice je dio žice od kontaktne vodilice do početka električnog luka. Promjena ovog parametra utječe na jakost struje zavarivanja na način da povećanjem slobodnog kraja žice raste otpor protoku struje i jakost struje pada. Za konstantnu dubinu penetracije vrlo je bitno održavati jednaku duljinu slobodnog kraja žice. U Tablici 1. prikazane su karakteristične vrijednosti slobodnog kraja žice. [1]

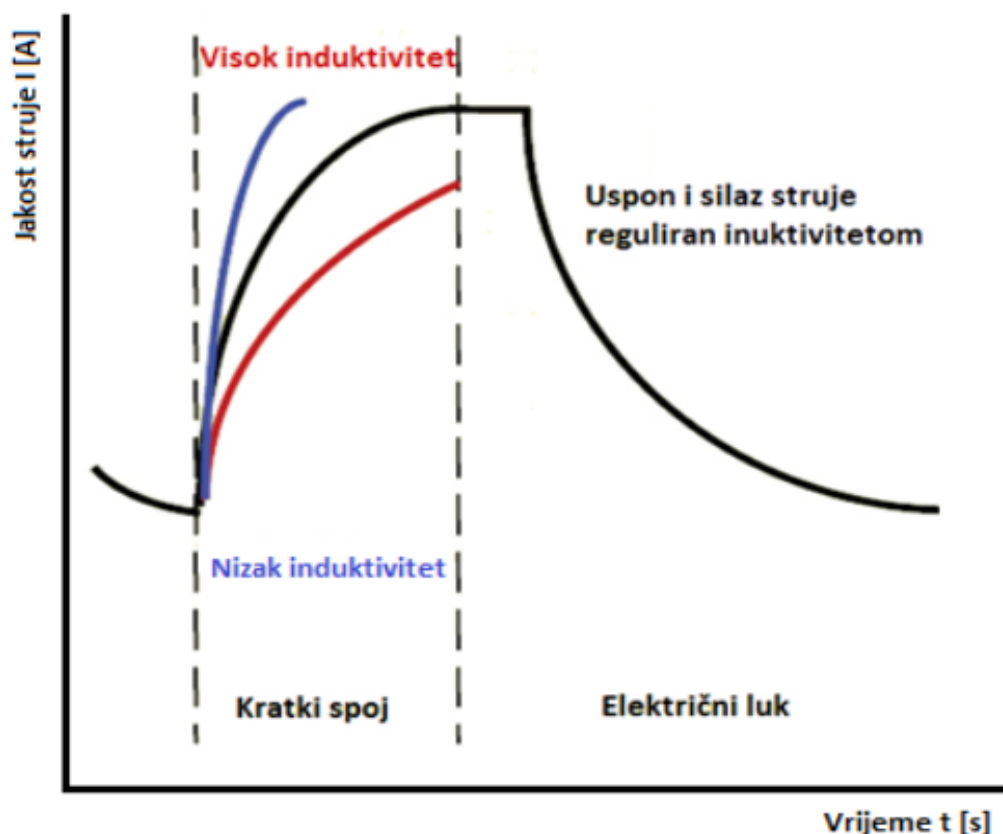
Tablica 1. Karakteristične vrijednosti slobodnog kraja žice [1]

PROMJER ŽICE (mm)	JAKOST STRUJE (A)	SLOBODNI KRAJ ŽICE (mm)
(0,6 - 0,8) mm	≤ 100 A	≤ 10 mm
(0,9 – 1,2) mm	100 - 200 A	10 - 15 mm
(1,2 – 1,4) mm	200 - 350 A	15 - 20 mm
(1,6 – 2,0) mm	≥ 350 A	20 - 25 mm

2.1.5. Induktivitet

Induktivitet je karakteristična kontrolna varijabla modernih izvora struje za MAG zavarivanje. Induktivitet ima utjecaj samo na neke načine prijenosa metala u električkom luku (posebno kod prijenosa kratkim spojevima). Povećanjem induktiviteta smanjuje se frekvencija kapljica u prijenosu kratkim spojevima. [1]

Induktivitet je parametar kojim opisujemo brzinu porasta jakosti struje unutar vremenskog perioda nakon ostvarivanja kratkog spoja. Induktivitet je jedan od glavnih parametara koji se može podesiti na izvoru struje za zavarivanje MAG postupkom. Koristi se kod zavarivanja kratkim spojevima dok se kod ostalih načina prijenosa metala u električnom luku ne koristi jer ne dolazi do kratkog spoja nego je jakost struje približno kontinuirana. Koristi se zbog finog podešavanja parametara zavarivanja čime se postiže efikasniji prijenos metala u električnom luku i željeni izgled zavora. Induktivitet se podešava prema debljini radnog komada, vrsti osnovnog materijala, položaju zavarivanja te vrsti zavarenog spoja. Današnji moderni izvori struje za zavarivanje imaju automatsku regulaciju induktiviteta ovisno o nizu podešenih parametara. Slika 4. prikazuje podešavanje uzlazne i silazne struje kratkog spoja preko podešavanja induktiviteta. [3]



Slika 4. Podešavanje uzlazne i silazne struje kratkog spoja pomoću induktiviteta [3]

Iz Slike 4. vidljivo je da brzina porasta struje zavarivanja do željene vrijednosti ovisi o induktivitetu. Kad je induktivitet visok porast struje na željenu vrijednost je sporiji, dok kod niskog induktiviteta struja zavarivanja brže postiže podešenu vrijednost.

2.1.6. Protok zaštitnog plina

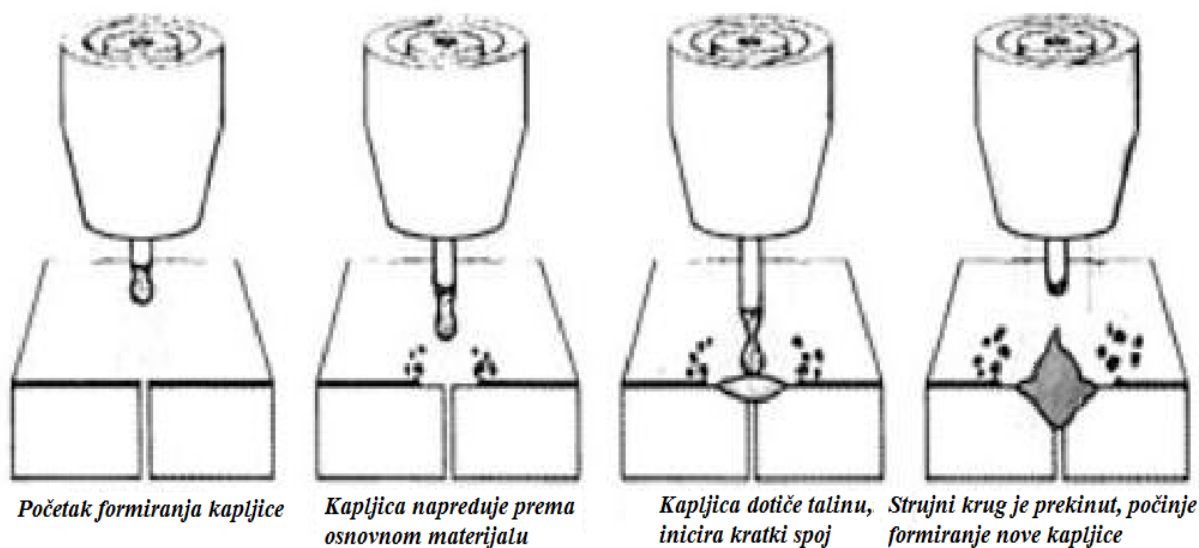
Zaštitni plin štiti područje zavora od reakcije s okolnom atmosferom te izravno utječe na oblik profila zavora, brzinu zavarivanja i stabilnost električnog luka. Protok zaštitnog plina podešava se u skladu s jakosti struje zavarivanja, uvjetima zavarivanja i željenim karakteristikama spoja. Povećanje jakosti struje zahtijeva i povećanje protoka zaštitnog plina da bi se smanjila mogućnost pojave grešaka u zavarenom spoju. [1]

2.2. Načini prijenosa metala u električnom luku

Pri konvencionalnom MAG zavarivanju postoje četiri osnovna načina prijenosa metala u električnom luku i to su: prijenos metala kratkim spojevima, prijenos metala prijelaznim lukom, prijenos metala štrcajućim lukom te prijenos metala impulsnim lukom. Uz ova četiri osnovna načina prijenosa metala u električnom luku postoji još prijenos metala rotirajućim lukom. Način prijenosa metala u električnom luku ovisi o: naponu, jakosti struje zavarivanja, vrsti zaštitnog plina, polaritetu i dodatnom materijalu.

2.2.1. Prijenos metala kratkim spojevima

Prijenos metala kratkim spojevima (eng. Short-Circuit Metal Transfer) je način prijenosa metala u električnom luku gdje se kontinuirano dobavljana žica tali usljed kratkih spojeva elektrode (žice) i osnovnog materijala ili taline. Na Slici 5. prikazan je jedan ciklus prijenosa metala kratkim spojevima.

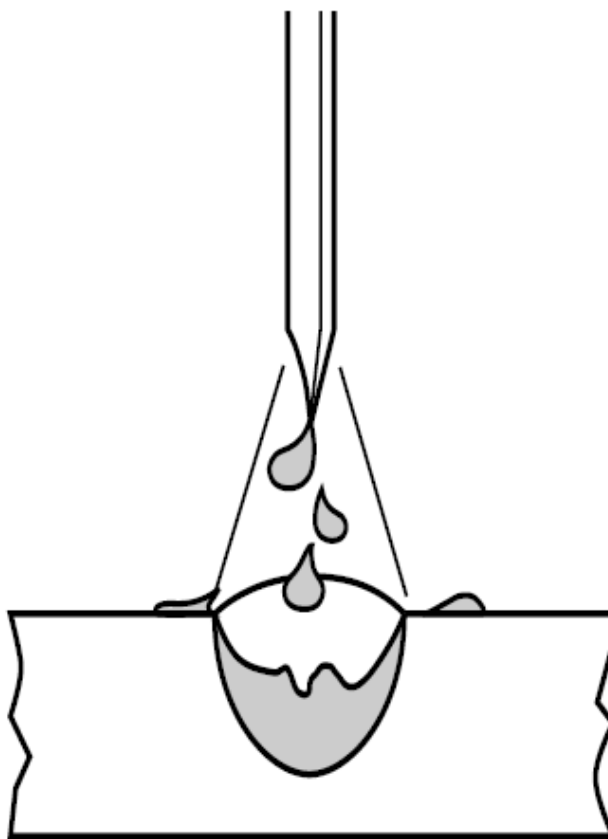


Slika 5. Jedan ciklus prijenosa metala kratkim spojevima [1]

Kod prijenosa metala kratkim spojevima koriste se male struje zavarivanja (od 50 do 170 A), mali naponi (od 13 do 21 V) te mali promjeri žice (od 0,6 do 1,2 mm). Zbog niskog unosa topline, što je karakteristično za ovaj način prijenosa, pogodan je za zavarivanje tanjih materijala (0,6 do 5,0 mm) te je pogodan kod zavarivanja korijenskog prolaza kod cjevovoda. Zavarivanje ovim načinom prijenosa metala u električnom luku provodi se u zaštitnoj atmosferi 100% CO₂ ili u mješavinama CO₂, argona i O₂. Prednosti ovog načina prijenosa metala u električnom luku su: pogodnost za zavarivanje u svim položajima, manje deformacije kao posljedica niskog unosa topline te visoka iskorištenost elektrode. Nedostaci ovog načina prijenosa i razlog zbog kojeg su nastali modificirani MAG postupci su: nedovoljna penetracija i pretjerano štrcanje ako kontrola postupka nije dobra. [1,2,4]

2.2.2. Prijenos metala prijelaznim lukom

Prijenos metala prijelaznim lukom (eng. Globular Transfer) je način prijenosa kod kojeg se kontinuirano dobavljana žica tali uslijed kombinacije štrcajućeg luka i prijenosa metala kratkim spojevima. Kod ovog načina prijenosa koriste se struje zavarivanja od 170 do 235 A te napon od 22 do 25 V što za posljedicu ima veće kapljice unutar luka koje se nepravilno odvajaju i padaju u talinu pri čemu uzrokuju štrcanje. Provodi se u zaštitnoj atmosferi 100% CO₂ ili u plinskoj mješavini CO₂ i argona. Nedostaci ovog načina prijenosa metala u električnom luku su: ograničeno zavarivanje na horizontalne i ravne položaje zavarivanja, ograničena debljina osnovnog materijala (minimalno 3 mm), skupa naknadna obrada zbog štrcanja i manja iskorištenost elektrode. Zbog nabrojenih nedostataka ovaj način prijenosa metala se ne koristi. Slika 6. prikazuje shematski prikaz prijenosa metala prijelaznim lukom. [1,2,4]



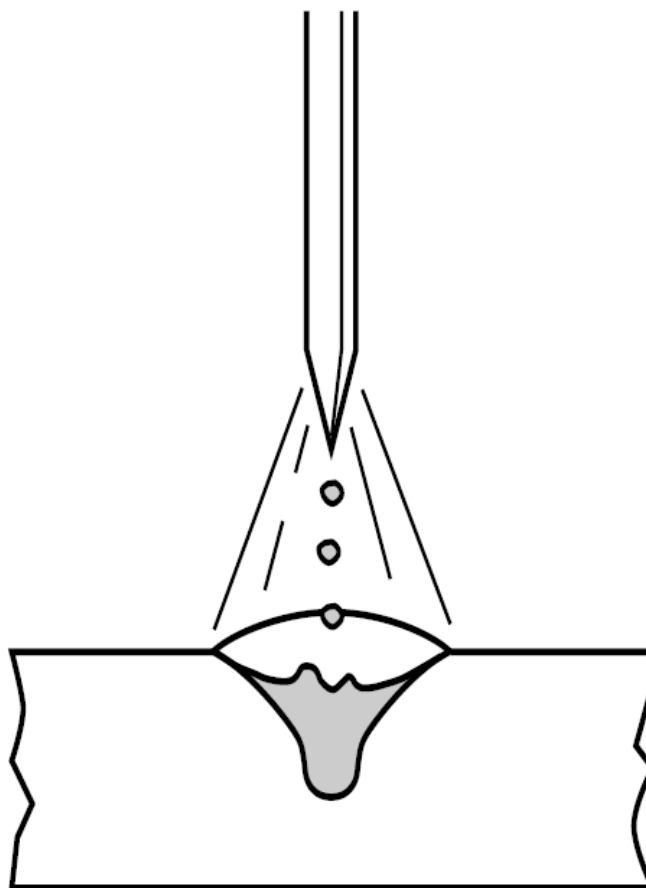
Slika 6. Shematski prikaz prijenosa metala prijelaznim lukom [1]

2.2.3. Prijenos metala štrcajućim lukom

Prijenos metala štrcajućim lukom (eng. Axial Spray Transfer) je način prijenosa metala u električnom luku kod kojeg je karakterističan veliki unos topline pri čemu se kontinuirano dobavljana žica tali i u obliku malih kapljica, slobodnim letom, putuje duž električnog luka pri čemu elektroda niti jednog trenutka ne dodiruje radni komad. Ovaj način prijenosa je vrlo stabilan. Odabir ovog načina prijenosa ovisi o debljini osnovnog materijala i položaju zavarivanja. Parametri zavarivanja veći su nego kod prethodnih načina te je struja zavarivanja od 200 do 600 A dok je napon od 25 do 40 V. Uspješna provedba ovog načina prijenosa metala u električnom luku zahtijeva plinsku mješavinu CO_2 , argona i O_2 u kojoj udio CO_2 mora biti manji od 18%. Prednosti prijenosa metala štrcajućim lukom su: veliki depozit, visoka iskorištenost elektrode, širok spektar materijala koje je moguće zavariti, velik raspon promjera žice, nema štrcanja i ne zahtijeva naknadno čišćenje, vrlo lako se automatizira i lijep

izgled zavora. Nedostaci ovog načina prijenosa metala u električnom luku su: ograničenost položaja zavarivanja, skuplji zaštitni plinovi, mogućnost primjene samo za deblje materijale.

Slika 7. prikazuje shematski prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom. [1,2,4,5]

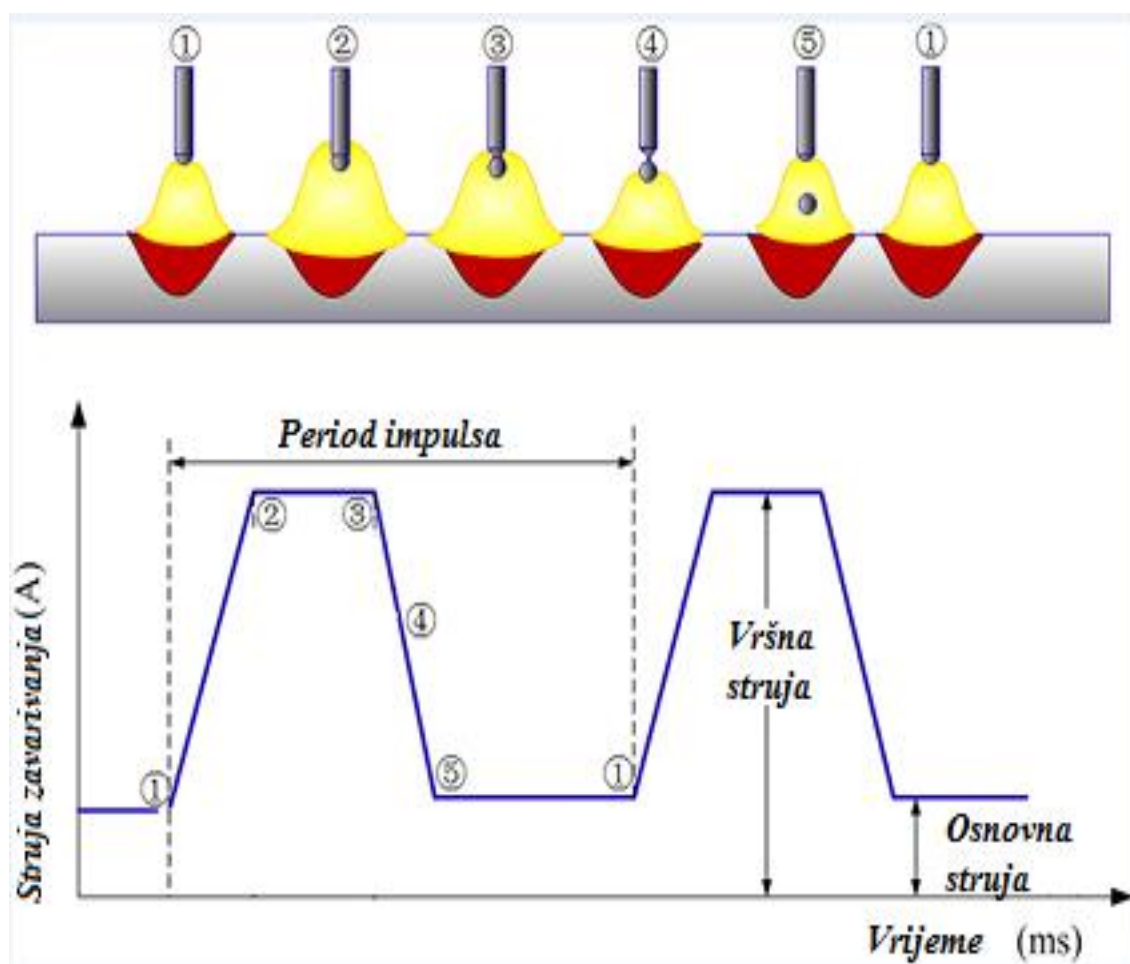


Slika 7. Shematski prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom [1]

2.2.4. Prijenos metala impulsnim lukom

Prijenos metala impulsnim lukom (eng. Pulsed Spray Transfer) je verzija štrcajućeg luka, ali uz visoku kontrolu postupka. Izvor struje generira promjenjiv oblik struje tj. mijenja iznos struje od vršne vrijednosti do osnovne vrijednosti. Pri vršnom iznosu struje zavarivanja (od 250 do 650 A) kapljica se odvaja i slobodnim letom putuje duž električnog luka. Nakon toga struja pada na osnovnu vrijednost (od 20 do 50 A) te stabilizira luk i osigurava srednju vrijednost unosa topline. Tijekom jednog impulsa odvaja se samo jedna kapljica, a depozit se regulira promjerom žice i brojem impulsa tj. frekvencijom (od 20 do 300 Hz). Povećanjem

brzine dobave žice (od 2 do 15 m/min), proporcionalno, raste i frekvencija impulsnog zavarivanja čime se omogućava zavarivanje širokog spektra debljina osnovnog materijala. Impulsni luk moguć je samo u plinskim mješavinama bogatim argonom. Prednosti ovog načina prijenosa metala u električnom luku su: izostanak štrcanja, male deformacije kao posljedica niskog unosa topline, mogućnost automatiziranja, mogućnost zavarivanja velikim brzinama, velika iskorištenost elektrode. Ovaj način zapravo zadržava prednosti štrcajućeg luka, dok istodobno otklanja njegove nedostatke. Nedostaci ovog načina prijenosa metala u električnom luku su: skuplja oprema, skuplje plinske mješavine, potrebna je dodatna zaštita zavarivača zbog veće energije električnog luka te manja produktivnost od prijenosa metala kratkim spojevima. Slika 8. prikazuje ciklus prijenosa metala impulsnim lukom s označenim parametrima postupka. [1,2,4,6]

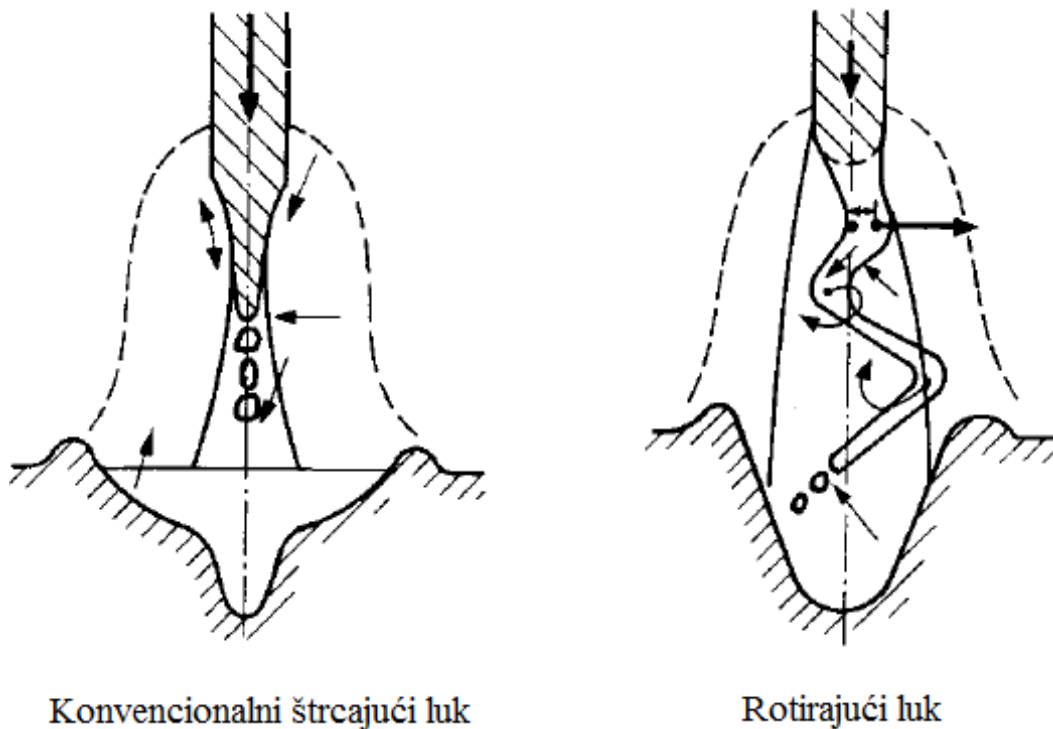


Slika 8. Ciklus prijenosa metala impulsnim lukom [1]

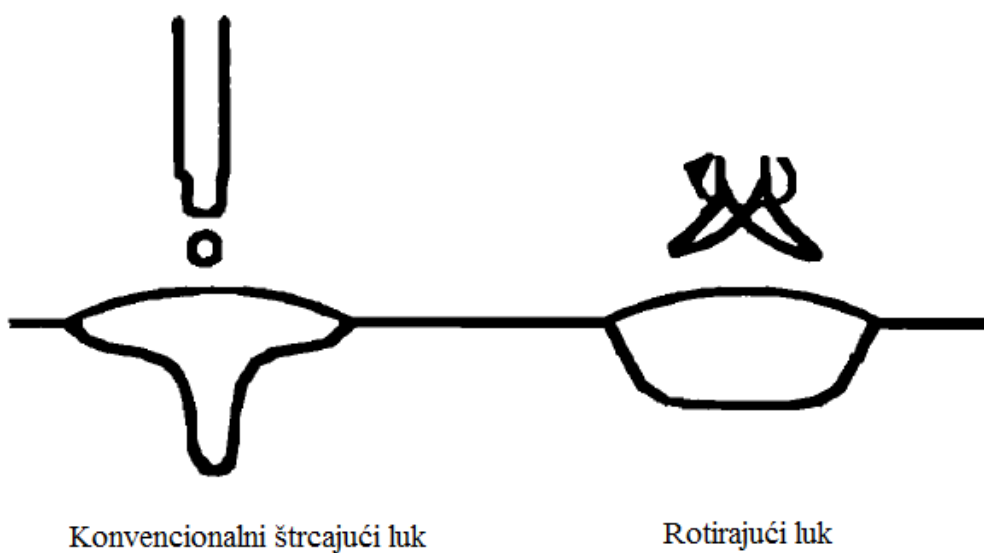
2.2.5. Rotirajući luk

Rotirajući luk je način prijenosa metala u električnom luku koji spada u grupu visokoučinskih postupaka MAG zavarivanja. Visokoučinski postupci MAG zavarivanja su oni postupci MAG zavarivanja koji imaju mogućnost dodavanja jedne ili više žica brzinom većom od 15 m/min. Time se povećava količina nataljenog metala što se može iskoristiti za povećanje volumena zvara ili za povećanje brzine zavarivanja. Rotirajući luk je karakterističan po rotacijskom prijenosu rastaljenog kraja žice. Slika 9. prikazuje shematski prikaz prijenosa metala štrcajućim i rotirajućim lukom. Kod rotirajućeg luka vrh žice tali se na osnovu velikog slobodnog kraja žice i velike struje zavarivanja. Uslijed povećanja slobodnog kraja žice, da ne bi došlo do pada struje zavarivanja i slabije penetracije, povećava se brzina dodavanja žice čime se struja zavarivanja održava konstantnom. Povećanjem struje zavarivanja, na kraju žice, razvija se Jouleova toplina koja tali žicu i bez utjecaja električnog luka. Povećanje topline u slobodnom kraju žice, zbog Jouleovog zakona, raste proporcionalno s njenom dužinom, vremenom i kvadratom struje te se na taj način kod iste struje prirast taljenja dodatnog materijala povećava i za 20%. Kod prijenosa metala rotirajućim lukom koriste se plinske mješavine argona uz dodatak kisika kod kojih dolazi do snažnog smanjenja površinske napetosti taline, te se na kraju žice prvo stvara rastaljeni metal u obliku gusjenice, koji se zatim odvaja u sitne kapljice. Upravo te mješavine plinova potiskuju nestabilan visokoučinski štrcajući luk te omogućava izravan prijelaz iz stabilnog konvencionalnog štrcajućeg luka u rotirajući luk. Radijalna komponenta sile magnetskog polja upravlja rastaljenom gusjenicom te je pomiče iz simetrale i rotira. Upravo zbog te rotacije i amplitude električni luk se konusno proširuje, posebno kad je dovoljne dužine. Rastaljeni metal u sitnim kapljicama ulazi u talinu zvara. Rotirajući luk je visoko stabilan električni luk koji zahtijeva duljinu slobodnog kraja žice od 25 mm do 35 mm. Zavari su plosnati i široki. Na Slici 10. prikazan je izgled profila zvara dobiven rotirajućim lukom u usporedbi s konvencionalnim štrcajućim lukom. Visokoučinsko MAG zavarivanje rotirajućim lukom moguće je postići samo punim žicama i to najčešće promjera 1,0 mm i 1,2 mm. Žice manjeg promjera, zbog manje stabilnosti pri velikim brzinama, nisu pogodne, dok se kod žica većeg promjera ne može ostvariti potrebno zagrijavanje slobodnog kraja žice, što je za rotirajući luk nužno. Rotirajući luk koristi se za zavarivanje materijala srednjih i velikih debljina u proizvodnji i izradi različitih čeličnih konstrukcija u strojogradnji, kotlogradnji i dr. Zavari su pravilnog profila, s dobro protaljenim

rubovima što ovaj način prijenosa metala u električnom luku čini pogodnim za dinamički opterećene zavarene spojeve. [7,8]



Slika 9. Shematski prikaz prijenosa metala štrcajućim i rotirajućim lukom [8]



Slika 10. Izgled profila zavora rotirajućeg luka u usporedbi s štrcajućim lukom [8]

3. IZVORI STRUJE ZA MAG ZAVARIVANJE

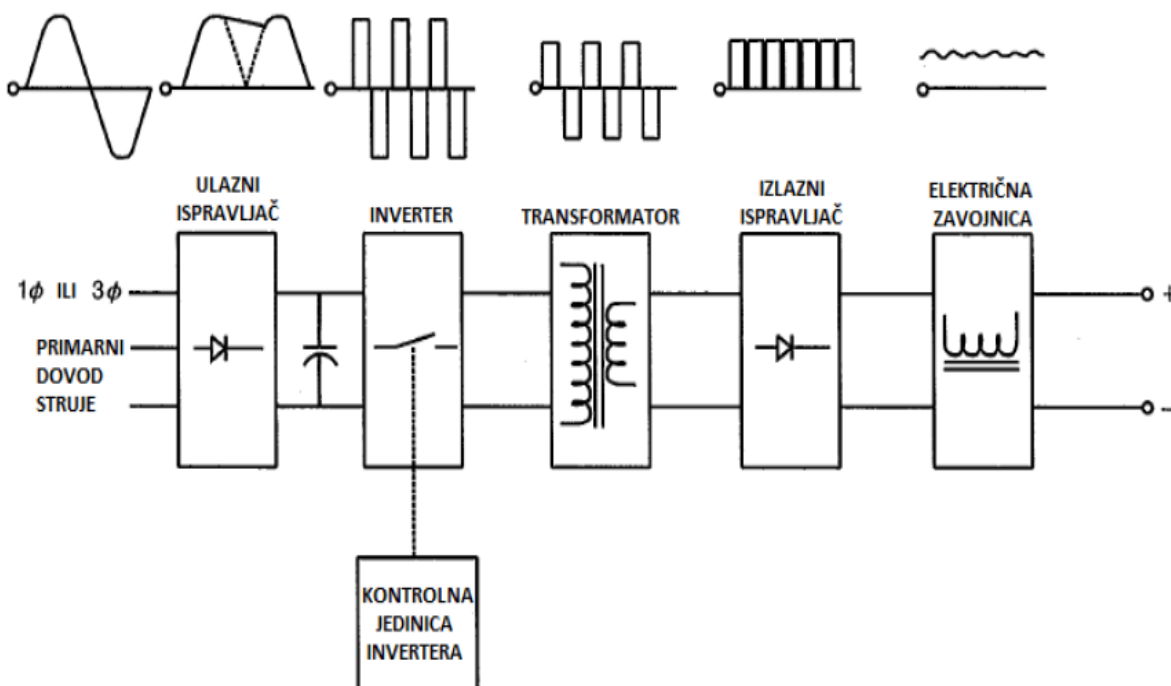
Izvori struje za zavarivanje su uređaji za proizvodnju struje različitih vrsta i svojstava, kojima se ostvaruje postupak zavarivanja. Ovisno o unutrašnjoj građi izvora struje, o čemu ovisi vrsta i svojstva izlazne struje, izvori struje za zavarivanje dijele se na: transformatore, ispravljače i invertore kao uređaje koji se spajaju na električnu mrežu te na motore s unutrašnjim izgaranjem s generatorom koji se koriste na mjestima gdje je električna mreža slaba ili je uopće nema. Vrstu izvora struje odabiremo na temelju željene izlazne struje i njenih svojstava. [3]

Danas se, kao izvori struje za MAG zavarivanje, najčešće koriste inverterski izvori struje za zavarivanje.

3.1. Inverterski izvori struje za MAG zavarivanje

Dizajn i mogućnosti izvora struje za zavarivanje su se promijenili i nastavljaju se, ubrzano, mijenjati. Izvori struje za zavarivanje bazirani na inverterskoj tehnologiji su pokretači tih promjena. [9]

Inverterski izvori struje za zavarivanje razvijeni su korištenjem visoko energetske poluvodiča kao što su IGBT (eng. Insulated Gate Bipolar Transistor) koji omogućavaju prekidni izvor napajanja koji ima mogućnost da podnese velika strujna opterećenja izazvana postupkom zavarivanja. Inverter je elektronički sklop koji, prije transformacije, pretvara izmjeničnu u istosmjernu struju. Glavni razlog stavljanja invertera prije transformatora je u tome što broj zavoja transformatora, linearno opada s povećanjem frekvencije na ulazu što za posljedicu ima korištenje, dimenzijski, malih izvora struje. Nakon pretvaranja struje, tranzistorske sklopke brzim prebacivanjem iz područja zapiranja u područje zasićenja stvaraju visokofrekventni napon (10000 do 20000 Hz). Prolaskom ove struje kroz transformator nastaje izmjenična struja, niskog napona ali vrlo visoke jakosti struje. Slika 11. prikazuje blok dijagram punovalnog ispravljača s Graetзовim spojem na kojem je vidljiva građa inverterskih izvora struje za zavarivanje. [3]



Slika 11. Blok dijagram inverterskog izvora struje za zavarivanje [3]

Inverterski izvori struje za zavarivanje imaju: visoku iskoristivost (oko 90%), vrlo preciznu regulaciju izlaznih parametara, zaštitu od preopterećenja, mogućnost promjene parametara zavarivanja tijekom rada u realnom vremenu, kontrolu impulsne struje (jakost, gustoća struje, omjer na kojem je polu struja duže zadržana, frekvencija impulsa te uzlazna i silazna karakteristika), napredniju kontrolu dodavanjem novog programskog paketa, brže vrijeme reakcije u odnosu na jednostavne transformatore i ispravljače te su manjih dimenzija nego transformatori. [3]

Inverterski izvori struje za zavarivanje imaju mogućnost zavarivanja zavarenih spojeva visoke kvalitete različitim postupcima zavarivanja na istom uređaju. Tako se na istom uređaju može zavarivati REL, MAG, MIG, TIG postupcima te je moguće i žljebljenje. Zbog svoje efikasnosti inverterski izvori struje za zavarivanje omogućavaju uštede električne energije. [10]

3.1.1. Podešavanje parametara MAG zavarivanja

Izvori struje za MAG zavarivanje najčešće nemaju direktno podešavanje jakosti struje zavarivanja nego se ona mijenja podešavanjem brzine dobavljanja žice. Podešavanjem napona mijenja se duljina električnog luka i način prijenosa metala u električnom luku. Podešavanje parametara MAG zavarivanja moguće je izvesti na dva načina: klasično ili pomoću sinergijskih krivulja. Klasično podešavanje parametara MAG zavarivanja odnosi se na odvojeno podešavanje brzine dobavljanja žice (samim time i jakosti struje zavarivanja) i napona. Podešavanje parametara preko sinergijskih krivulja uvelike olakšava podešavanje parametara zavarivanja jer se podešavanjem brzine dobavljanja žice podešavaju i ostali parametri zavarivanja. Parametri se podešavaju u ovisnosti o vrsti osnovnog materijala te ovisno o zaštitnom plinu. [11,12,13]

3.1.1.1. Sinergijske krivulje

Podešavanje parametara pomoću sinergijskih krivulja uvelike olakšava MAG zavarivanje. Sinergijska kontrola bazira se na podešavanju preko samo jednog potenciometra (eng.one knob control) te omogućava zavarivaču da odabirom jednog parametra zavarivanja automatski podesi i preostale parametre. Nakon odabira zaštitnog plina i vrste osnovnog materijala te podešavanja brzine dodavanja žice, ostali parametri se podešavaju automatski. Sinergijske krivulje su unaprijed definirane krivulje koje međusobno povezuju parametre zavarivanja. Sinergijske krivulje dolaze pohranjene u memoriji izvora struje za zavarivanje. Moguće ih je naknadno mijenjati te dodavati nove. Podešavanje parametara bazirano na sinergijskim krivuljama koristi se i kod konvencionalnog MAG zavarivanja i kod impulsnog MAG zavarivanja. Kod konvencionalnog MAG zavarivanja pomoću sinergijskih krivulja napon se podešava odabirom brzine dobavljanja žice. Kod impulsnog MAG zavarivanja podešavanjem parametara osnovnog i dodatnog materijala te zaštitnog plina podešavaju se napon i svi ostali parametri impulsa [4,6,12,13]

3.1.2. Specifične funkcije inverterskih izvora struje za MAG zavarivanje

Specifične funkcije inverterskih izvora struje za MAG zavarivanje su funkcije koje povećavaju produktivnost i penetraciju te dodatno stabiliziraju električni luk tj. omogućavaju modifikacije načina prijenosa metala u električnom luku. Proizvođači opreme za zavarivanje razvijaju ove funkcije da bi poboljšali konvencionalno MAG zavarivanje i uklonili njegove nedostatke. Upravo ove specifične funkcije omogućavaju razvoj modificiranih MAG postupaka zavarivanja. U nastavku će biti navedene specifične funkcije, trgovačkim imenom koje im je dao proizvođač. Kod drugih proizvođača postoje specifične funkcije koje se baziraju na istim principima i imaju isto područje primjene ali pod drugačijim trgovačkim imenima.

3.1.2.1. WiseThin™

WiseThin™ je specifična funkcija iz skupine softverskih rješenja, oznake Wise, tvrtke Kemppi za poboljšanje konvencionalnog MAG zavarivanja. WiseThin™ je posebno oblikovan „hladni“ način prijenosa metala u električnom luku za ručno i automatizirano zavarivanje limova i lemljenje. WiseThin™ je proces kod kojeg se struja i napon digitalno kontroliraju. Kontrolom parametara kontrolira se trenutak odvajanja kapljice pri prijenosu metala kratkim spojevima. Karakteristika WiseThin™ procesa slična je karakteristikama WiseRoot™ postupka, no zbog frekvencije i ponašanja električnog luka, brzina zavarivanja WiseThin™ postupka veća je od one kod WiseRoot™ postupka. Ovaj postupak koristi se u automobilske industriji. Prednosti ove specifične funkcije su: smanjuje pojavu štrcanja kod svih materijala uključujući i pocinčane limove, 10-25% manje unosa topline nego kod konvencionalnog MAG postupka što dovodi do manjih deformacija nakon zavarivanja, odlična kontrola taline neovisno o vrsti pripreme zavarenog spoja, smanjenje potrebe za naknadnom obradom te povećanje brzine zavarivanja. Na Slici 12. prikazan je proizvod zavaren uz pomoć WiseThin™ softverskog dodatka. [14,15]



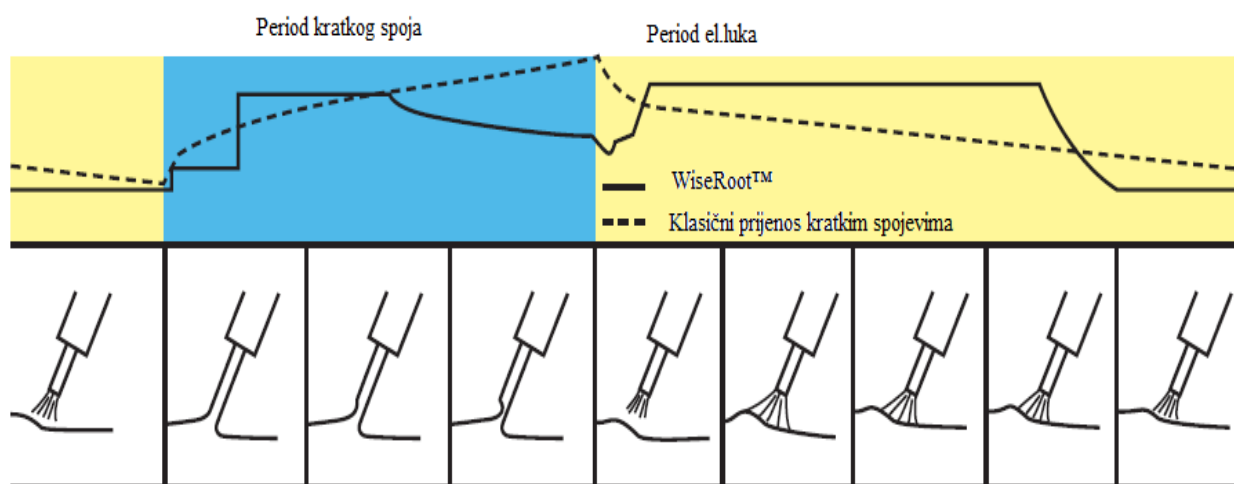
Slika 12. Proizvod zavaren uz pomoć funkcije WiseThin™ [15]

3.1.2.2. WiseFusion™

WiseFusion™ je, također, specifična funkcija iz skupine softverskih rješenja, oznake Wise, tvrtke Kemppi za poboljšanje konvencionalnog MAG zavarivanja. Ova funkcija kreira i održava optimalnu karakteristiku kratkog spoja kod impulsnog MAG zavarivanja i kod prijenosa metala štrcajućim lukom. Održava duljinu električnog luka optimalno kratkom kod ručnog i automatiziranog MAG zavarivanja. Ova funkcija osigurava stalnu kvalitetu zavarenog spoja u svim pozicijama zavarivanja te eliminira potrebu za podešavanjem parametara, kad se oni jednom podese. Prednosti ove funkcije su: automatska regulacija električnog luka kod impulsnog MAG zavarivanja i kod prijenosa metala štrcajućim lukom, odlična kontrola taline u svim položajima zavarivanja, uzak i koncentriran električni luk, poboljšan izgled i kvaliteta zavarenog spoja te povećana brzina zavarivanja. [14,15]

3.1.2.3. WiseRoot™

WiseRoot™ je specifična funkcija iz skupine softverskih rješenja, oznake Wise, tvrtke Kemppi za poboljšanje konvencionalnog MAG zavarivanja. WiseRoot™ je visoko efikasni i posebno oblikovan prijenos metala kratkim spojevima za ručno ili automatizirano zavarivanje korijenskog prolaza. Ovaj prijenos metala kratkim spojevima uvelike se razlikuje od klasičnog prijenosa kratkim spojevima. Na Slici 13. prikazane su, usporedno, faze WiseRoot™ procesa i klasičnog prijenosa kratkim spojevima.



Slika 13. Prikaz WiseRoot™ načina prijenosa i klasičnog prijenosa kratkim spojevima [15]

U Tablici 2. opisane su faze klasičnog prijenosa metala kratkim spojevima i WiseRoot™ postupka. Iz tablice su vidljive razlike između ova dva načina prijenosa metala u električnom luku.

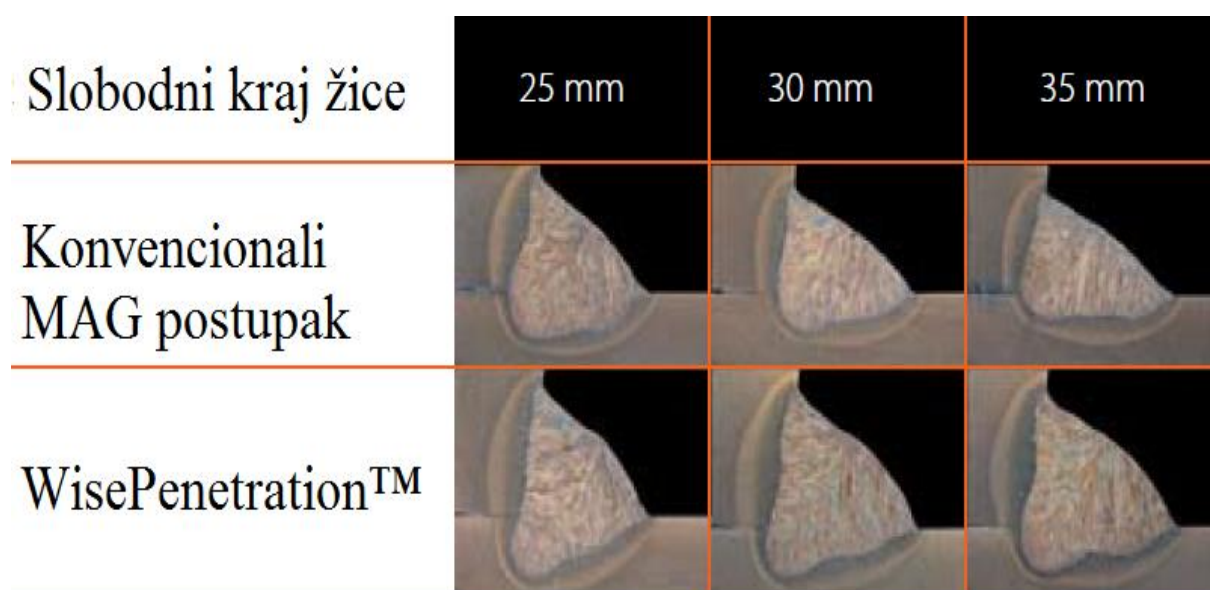
Tablica 2. Faze WiseRoot™ i klasičnog prijenosa metala kratkim spojevima [15]

WiseRoot™	Klasični prijenos kratkim spojevima
Period kratkog spoja	
Žica dotiče radni komad i kratko se spaja.	Žica dotiče radni komad i kratko se spaja.
Struja zavarivanja naglo raste što dovodi do „pinch-efekta“	Struja zavarivanja raste dok se ne postigne „pinch-efekt“ tj. smanjenje presjeka žice.
Kapljica se odvaja i mirno pada u talinu.	Kapljica se odvaja i pada u talinu.
Period električnog luka	
Električni luk se ponovno uspostavlja pri niskoj struji zavarivanja.	Električni luk se ponovno uspostavlja pri visokoj struji zavarivanja.
Žica i osnovni materijal se tale.	Žica i osnovni materijal se tale.
Kontrolirani električni luk stvara talinu.	Nastaje talina.
Struja brzo pada na baznu vrijednost.	Struja sporo pada na baznu vrijednost.

3.1.2.4. WisePenetration™

WisePenetration™ je, također, specifična funkcija iz skupine softverskih rješenja, oznake Wise, tvrtke Kemppi za poboljšanje konvencionalnog MAG zavarivanja. Ova funkcija omogućava konstantan unos topline pri zavarivanju neovisno o promjeni orijentacije pištolja za zavarivanje i udaljenosti između pištolja za zavarivanje i radnog komada. Ova funkcija pogodna je za ručno i za automatizirano MAG zavarivanje. Kod konvencionalnog MAG zavarivanja, unos topline pri zavarivanju se mijenja s udaljenošću radnog komada i pištolja za zavarivanje. Te promjene mogu rezultirati: nedovoljnom i nejednolikom penetracijom, promjenom profila zavora, povećanjem štrcanja te nedovoljnim protaljivanjem što dovodi do pada kvalitete zavarenog spoja. Ova funkcija sprječava pad struje zavarivanja, aktivno, podešavajući brzinu dodavanja žice što održava željena mehanička svojstva zavarenog spoja i

eliminira pogreške. Ako je slobodni kraj žice unutar nekih određenih granica ova funkcija ponaša se kao konvencionalni postupak MAG zavarivanja kod kojeg struja zavarivanja opada s povećanjem slobodnog kraja žice. No, ako se slobodni kraj žice poveća iznad te dopuštene vrijednosti, funkcija WisePenetration™ preuzima kontrolu i održava konstantnu vrijednost struje zavarivanja. Slika 14. prikazuje penetraciju konvencionalnog MAG zavarivanja i funkcije WisePenetration™ ovisno o slobodnom kraju žice.

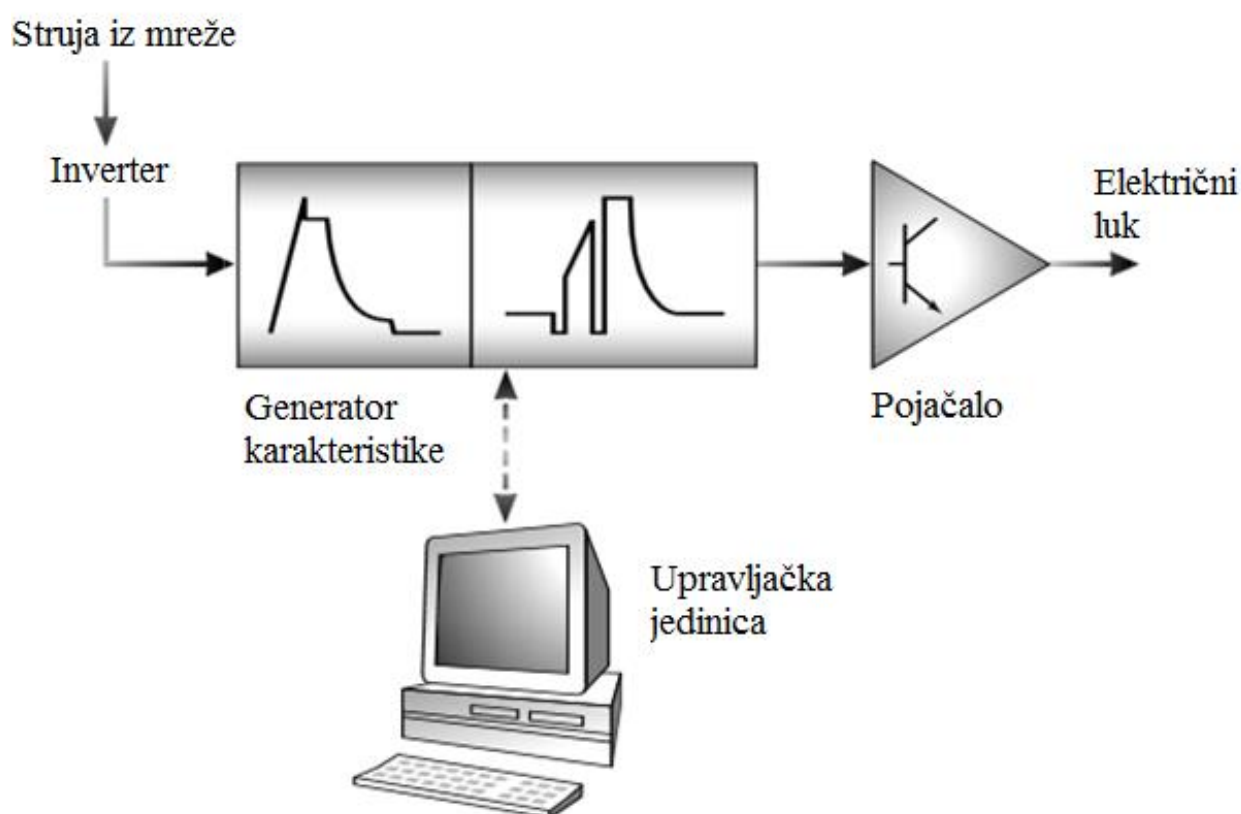


Slika 14. Penetracija u ovisnosti o slobodnom kraju žice kod konvencionalnog MAG zavarivanja i funkcije WiseRoot™ [15]

Prednosti ove funkcije su: smanjenje mogućnosti pojave nedovoljnog protaljivanja, smanjena potreba za podešavanjem parametara zavarivanja, smanjena potreba za naknadnom obradom uslijed smanjenja grešaka u zavarenom spoju, pogodnost za uporabu sa kratkim i dugim setovima kabela te bolja kvaliteta zavarenog spoja. [14,15]

3.1.2.5. Waveform Control Technology™

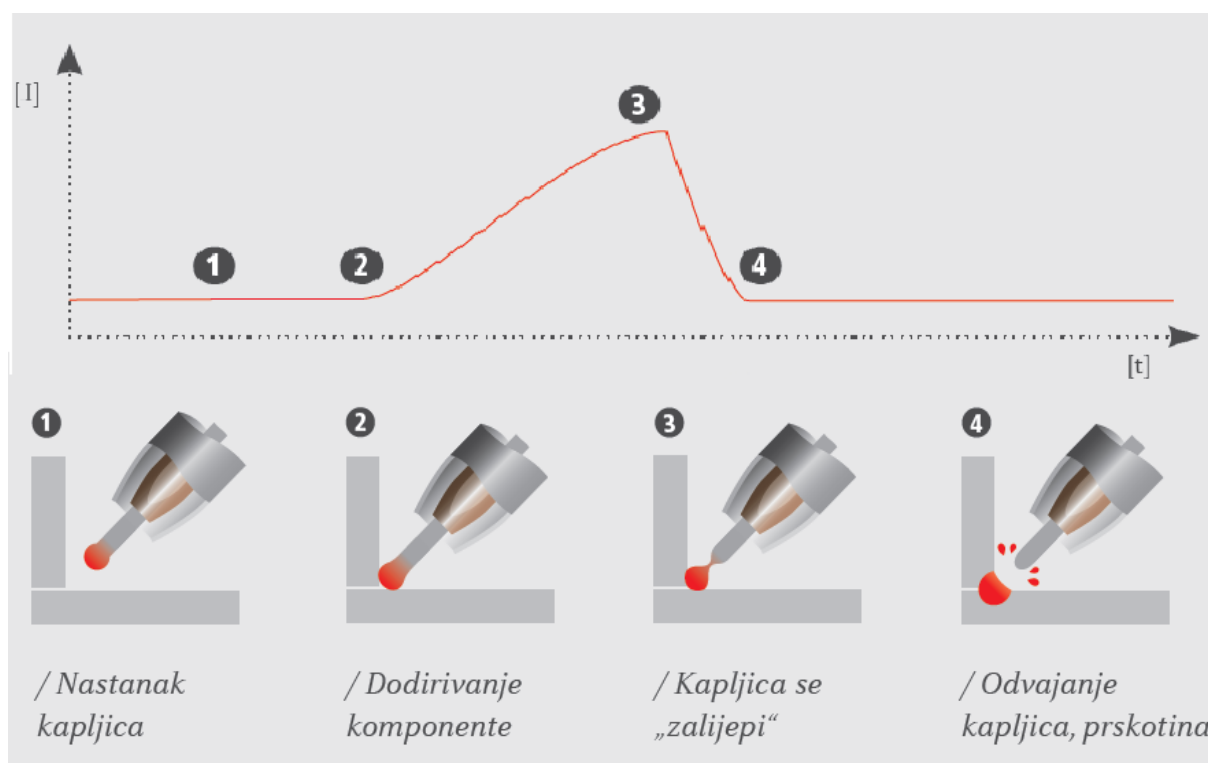
Waveform Control Technology™ je tehnologija, tvrtke Lincoln Electric, koja omogućava izradu željenog oblika izlazne/dinamičke karakteristike. Ova tehnologija omogućava izbor programa zavarivanja iz predefinirane skupine programa i manipulaciju parametrima tog postupka ovisno o željenoj aplikaciji. Omogućava korištenje jednog izvora struje za: REL, TIG, MIG/MAG, EPP zavarivanje te zavarivanje praškom punjenom žicom. Moderniji izvori struje za zavarivanje omogućavaju krajnjem korisniku izradu programa tj. željenog oblika karakteristike za impulsno MAG zavarivanje. Korištenjem ove tehnologije omogućeno je podešavanje parametara za određeni način prijenosa metala u električnom luku. Slika 15. prikazuje osnovnu postavku Waveform Control Technology™. [4]



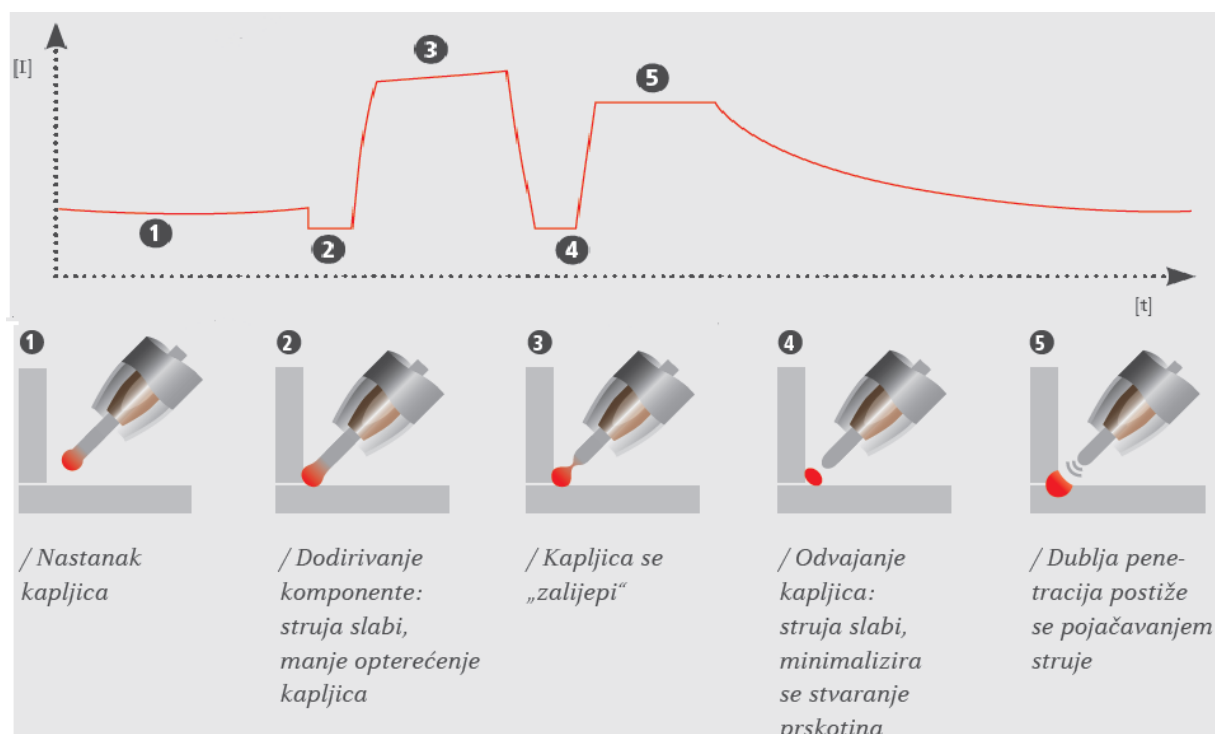
Slika 15. Klasična postava Waveform Control Technology™ [4]

3.1.2.6. LSC-Low Spatter Control

Low spatter control je funkcija izvora struje za MAG zavarivanje, tvrtke Fronius International GmbH, koja omogućava redukciju štrcanja i poboljšanu stabilnost električnog luka. Ova funkcija posjeduje stabilizatore za penetraciju i duljinu električnog luka te dvije savršeno usklađene karakteristike, a to su: LSC Root i LSC Universal. Ova funkcija poboljšava prijenos metala kratkim spojevima i to na način da regulira vrijednosti struje prilikom odvajanja kapljice taline. Također upotrebljava se i kod prijenosa metala štrcajućim lukom. Na Slici 16. prikazan je karakterističan ciklus prijenosa metala kratkim spojevima dok je na Slici 17. prikazan modificirani ciklus pomoću funkcije LSC. [16]

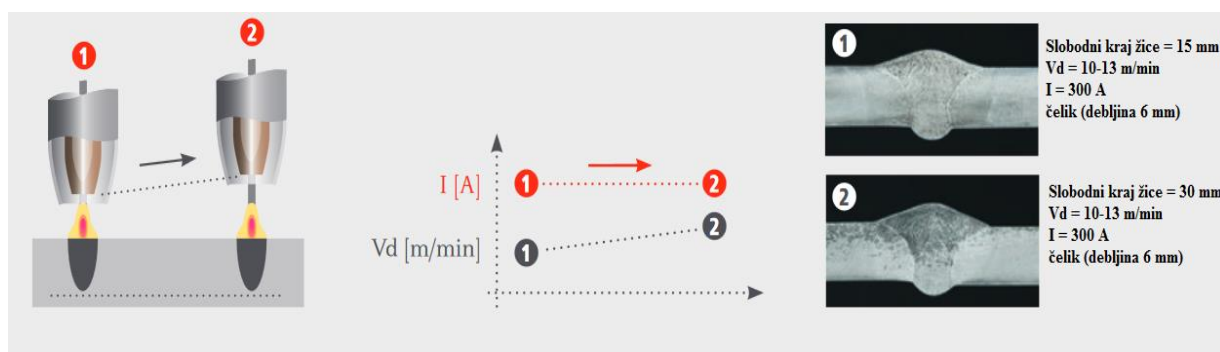


Slika 16. Ciklus prijenosa metala kratkim spojevima [16]

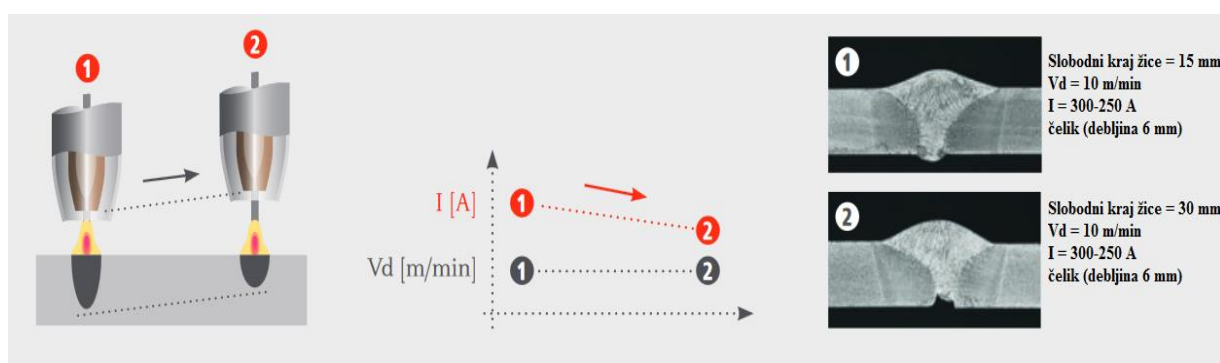


Slika 17. LSC prijenos metala kratkim spojevima [16]

Prednosti funkcije Low spatter control su: vrlo malo prskotina, smanjen unos topline i veći učinak taljenja pri zavarivanju korijena, izvrsna penetracija, velika brzina zavarivanja, mogućnost zavarivanja sa 100% CO₂, dodatne karakteristike LSC Root i LSC Universal te stabilizatori penetracije i duljine električnog luka. LSC Universal je funkcija koja omogućava odlične rezultate u zavarivanju preklopnih, sučeonih i kutnih spojeva te pri ispunama i prekrivanjima. LSC Root je funkcija koja osigurava odlično formiranje korijena te veći učinak taljenja veliku uz smanjeni unos topline. Omogućeno je vertikalno zavarivanje prema dolje bez straha od nedovoljnog protaljivanja što omogućava lakše zavarivanje korijenskog prolaza. Stabilizator penetracije je funkcija koja omogućava konstantnu penetraciju unatoč promjeni slobodnog kraja žice. To je moguće dodatnom regulacijom brzine dodavanja žice. Ova dodatna funkcija eliminira utjecaj slobodnog kraja žice. Slika 18. prikazuje postupak zavarivanja kratkim spojevima s uključenim stabilizatorom penetracije, dok Slika 19. prikazuje postupak bez stabilizatora penetracije. [16,17]



Slika 18. Prijenos metala kratkim spojevima uz stabilizator penetracije [16]



Slika 19. Prijenos metala kratkim spojevima bez stabilizatora penetracije [16]

Stabilizator električnog luka je funkcija koja kod prijenosa metala štrcajućim lukom omogućava skraćivanje duljine električnog luka pri čemu se on održava kratkim, dok kod prijenosa metala kratkim spojevima omogućava stabilan i ravnomjeran električni luk. U slučaju nekih vanjskih smetnji (promjena položaja zavarivanja, promjena debljine osnovnog materijala te neravnomjerni odlazak topline) korisnik ne treba ručno podešavati parametre. [16]

3.1.2.7. PMC-Pulse Multi Control

Pulse Multi Control je skup funkcija, tvrtke Fronius International GmbH, koje omogućavaju bolju kontrolu i bolje rezultate impulsnog MAG zavarivanja. Ovaj skup funkcija sadrži funkcije: SpeedNet, SFI-Spatter Free Ignition, SynchroPulse, završetak zavarivanja (eng. end of welding) te stabilizator penetracije i duljine električnog luka. SpeedNet omogućava brzi prijenos podataka te time omogućava brže vrijeme reakcije tijekom postupka zavarivanja.

Stabilizator penetracije i duljine električnog luka omogućava konstantnu vrijednost struje zavarivanja neovisno od slobodnog kraja žice. Duljina luka kontrolira se podešavanjem brzine dodavanja žice. Ovo omogućava veću brzinu zavarivanja te ujednačenu penetraciju. Stabilizator duljine električnog luka pri impulsnom luku stvara mikro kratke spojeve. Ovo za rezultat ima kratki i stabilan luk te naknadno podešavanje nije potrebno. Završetak zavarivanja je funkcija koja nakon zavarivanja, jednostavno uvuče žicu što omogućava uvijek čisti kraj žice. SFI je funkcija koja eliminira štrcanje tako da prilikom paljenja električnog luka u trenutku kad nastaje kratki spoj, reagira te udaljava žicu od radnog komada te ne dolazi do kratkog spoja pri paljenju električnog luka. SynchroPulse je funkcija koja omogućava kontrolu i podešavanje unosa topline preko podešavanja trajanja faze vršne struje te udjela ostalih faza. [17,18]

4. MODIFICIRANI NAČINI PRIJENOSA METALA U ELEKTRIČNOM LUKU

Modificirani načini prijenosa metala u električnom luku modifikacije su osnovnih načina prijenosa koji se u praksi najčešće koriste i to: prijenos metala kratkim spojevima i prijenos metala štrcajućim lukom. Nastali su da bi se eliminirali nedostaci osnovnih načina prijenosa metala u električnom luku kao i zbog zahtjeva za većom produktivnosti i stabilnosti samog postupka MAG zavarivanja. Razvoj modificiranih načina prijenosa metala u električnom luku omogućile su ranije navedene funkcije modernih, inverterskih, izvora struje za MAG zavarivanje. U nastavku će biti navedene modifikacije osnovnih načina prijenosa metala u električnom luku te modificirani postupci MAG zavarivanja koji su razvijeni na temelju njih. Također će bit objašnjen i prijenos metala rotirajućim lukom kao predstavnika visokoučinskog MAG zavarivanja.

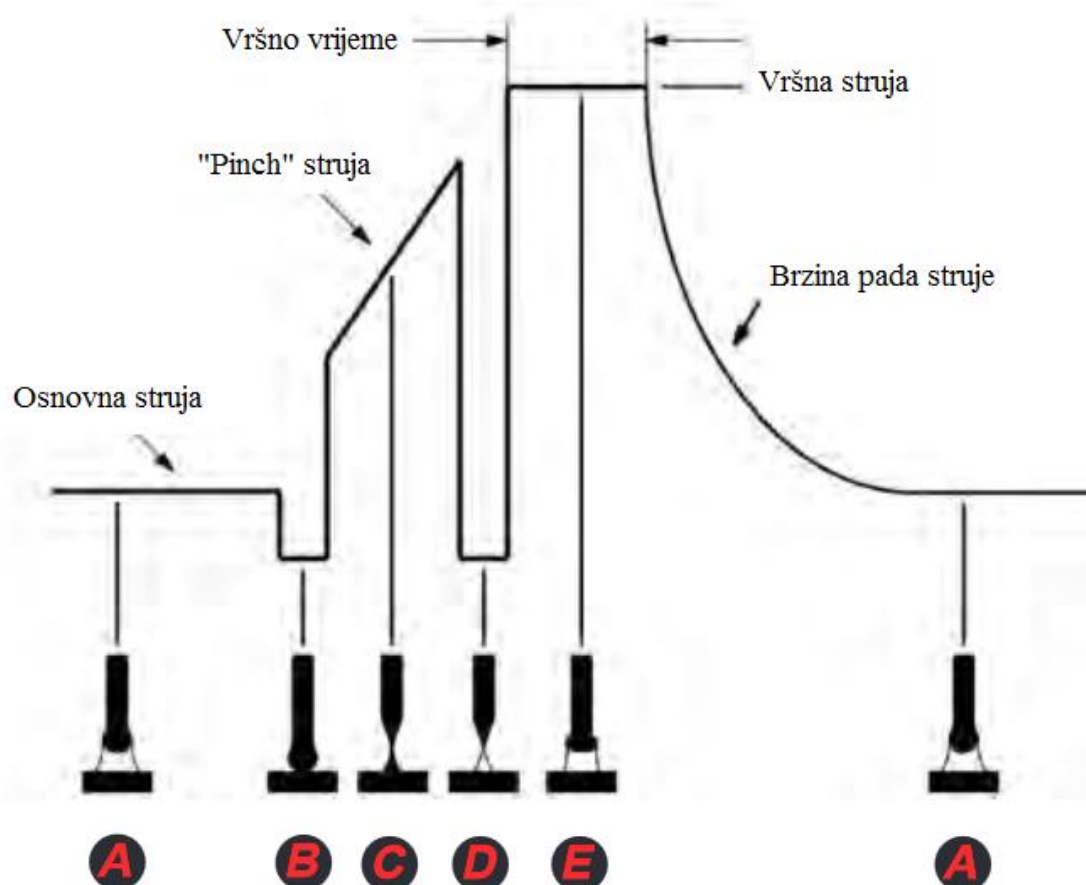
4.1. Modificirani prijenos metala kratkim spojevima

Klasični prijenos metala kratkim spojevima zbog svojih prednosti (zavarivanje u svim položajima, manje deformacija, manji unos topline i visoke iskoristivosti dodatnog materijala) je način prijenosa metala u električnom luku koji se kod MAG postupka zavarivanja najčešće koristi. Zbog nedostataka ovog načina prijenosa metala u električnom luku (nedovoljna penetracija, pretjerano štrcanje tj. smanjena stabilnost samog postupka) on se nastoji modificirati. Modifikacija prijenosa metala kratkim spojevima temelj je na kojem su se razvili modificirani postupci MAG zavarivanja kao što su: STT[®], CMT[®], FastROOT[®] i CBT[®]. Prednosti ovih postupaka tj. modificiranog načina prijenosa kratkim spojevima su: veća kontrola i stabilnost postupka, jednolika penetracija i smanjeno neželjeno štrcanje.

4.1.1. STT-Surface Tension Transfer[®]

STT (eng. Surface Tension Transfer) je modificirani postupak MAG zavarivanja i to kontrolirani prijenos metala kratkim spojevima kod kojeg se struja tj. unos topline kontrolira

neovisno o brzini dodavanja žice te tako promjena slobodnog kraja žice ne utječe na unos topline u zavareni spoj. Ovaj postupak razvila je tvrtka Lincoln Electric na temelju tehnologije upravljanja oblikom strujnog vala, Waveform Control Technology™. Izvor struje kontrolira električni luk te u vrlo kratkom vremenu reagira na promjene u njemu. Izvor struje za STT postupak nema niti ravnu niti strmopadajuću karakteristiku. STT postupak za finu regulaciju odvajanja kapljice u električnom luku koristi mehanizam površinske napetosti. Struja u električnom luku raste do granice na kojoj se prijenos rastaljenog metala odvija samo uz djelovanje površinske napetosti. Upravo ta kontrola sprječava porast struje koji za posljedicu ima štrcanje te istodobno maksimizira utjecaj površinske napetosti. Nakon odvajanja kapljice rastaljenog metala slijedi strujni impuls koji priprema i zagrijava žicu za novi ciklus. Nagib struje tog impulsa jako utječe na unos topline u zavareni spoj te je jedan od parametara koji se kontrolira u STT postupku zavarivanja. Parametri koji se reguliraju kod STT postupka su: vršna struja, pozadinska struja, topli start, brzina pada struje, brzina žice i slobodni kraj žice. Vršna struja (eng. Peak current) koristi se za definiciju duljine električnog luka te staljivanje s osnovnim materijalom. Ako je previsoka kapljica rastaljenog metala će biti prevelika. Osnovna struja (eng. Background current) osigurava unos topline u zavareni spoj te definira penetraciju u osnovni materijal. Topli start (eng. Hot start) je parametar koji utječe na uspostavljanje električnog luka te povećava unos topline pri uspostavljanju što sprječava pojavu naljepljivanja. Brzina pada struje (eng. Tail-out speed) je brzina kojom struja pada s vršne vrijednosti na vrijednost osnovne struje. Ovaj parametar osigurava dodatni unos topline te svojim povećanjem omogućava veću brzinu zavarivanja i bolje kvašenje. Brzina dobavljanja žice je parametar koji se zasebno podešava i utječe na količinu rastaljenog metala. Slobodni kraj žice utječe na geometriju zavora. Slika 18. prikazuje karakteristiku struje STT postupak zavarivanja. [19,3,4,20]



Slika 20. Strujna karakteristika STT postupka zavarivanja [19]

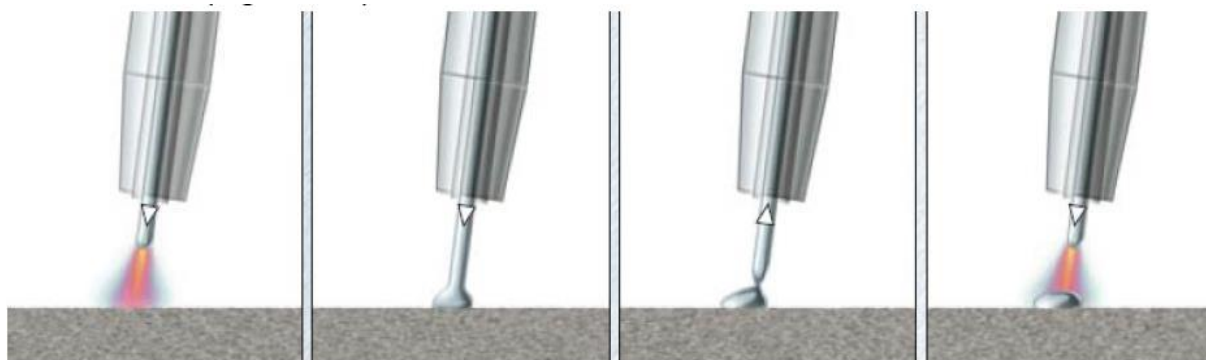
Na Slici 20. vidljive su faze STT postupka zavarivanja tj. jedan ciklus. U točki A nastaju jednolike kapljice taline koje se održavaju sve dok se kratko ne spoje s talinom. Kad se kapljica kratko spoji s talinom struja zavarivanja pada što omogućava da kapljica taline nakvasi talinu (točka B). U točki C automatski se uključuje precizna „pinch struja“ kako bi došlo do „pinch“ efekta te se kapljica taline odvojila i prešla u talinu. Kad je kapljica taline pred odvajanjem, struja pada što sprječava pojavu štrcanja. U točki D ponovno se uspostavlja električni luk niske struje zavarivanja. Nakon što se ponovno uspostavio električni luk, struja se automatski postavlja na vršnu vrijednost koja postavlja odgovarajuću duljinu električnog luka te osigurava željeni unos topline u zavareni spoj (slika E). U ovoj fazi kapljica rastaljenog metala se potpuno odvoji od žice. Nakon toga struja pada do osnovne vrijednosti te se postupak ponavlja. [19]

Prednosti STT postupka zavarivanja su: velika brzina zavarivanja i veća produktivnost od ostalih postupaka, manji unos topline, odlična kontrola taline, mogućnost korištenja različitih

mješavina zaštitnih plinova, kratko vrijeme treninga zavarivača, smanjeno štrcanje i mogućnost nastanka grešaka. Nedostaci STT postupka su: visoka cijena opreme u usporedbi s opremom za konvencionalno MAG zavarivanje, prijenos metala samo kratkim spojevima te uporaba ovog postupka samo u kombinaciji s nekim visokoučinskim postupkom zavarivanja za popunu žljeba. Ovaj postupak koristi se: pri zavarivanju korijena cijevi ili ploča, u petrokemijskoj i prehrambenoj industriji gdje se koriste nehrđajući čelici i legure nikla, u automobilskoj industriji pri zavarivanju tankih materijala, pri zavarivanju galvaniziranih čelika te za automatizirano i robotizirano zavarivanje. [19,21]

4.1.2. CMT-Cold Metal Transfer®

CMT je kratica za „hladni prijenos metala“ i opisuje postupak MAG zavarivanja čiji je unos topline mali u odnosu na konvencionalni MAG postupak zavarivanja. Kod ovog postupka žica se pomiče i odmiče od radnog komada, frekvencijom od oko 70 Hz tj. žica se oscilatorno dodaje. Žica se primiče radnom komadu sve dok se ne ostvari kratki spoj. Kad se to dogodi, mijenja se smjer žice i ona se odmiče od radnog komada. Kad se prekine kratki spoj žica ponovno mijenja smjer i ponovno se primiče radnom komadu. Prijenos metala odvija se uz vrlo malu struju zavarivanja, jer ona nije značajna za prekidanje kratkog spoja. Odmicanje žice od radnog komada potpomaže prijenosu metala uslijed površinske napetosti taline. Zbog toga struja kratkog spoja može biti niska, čime se smanjuje i unos topline. Slika 21. prikazuje faze CMT postupka zavarivanja.



Slika 21. Faze CMT postupka zavarivanja [22]

Kad se zahtijeva veći unos topline od onog koji se može ostvariti CMT postupkom zavarivanja, postoji mogućnost ubacivanja strujnih impulsa koji daju više topline i bolju penetraciju i to između ciklusa odvajanja kapljice. Ovaj postupak koristi se za: MIG lemljenje bez štrcanja metala, zavarivanje tankih limova te za zavarivanje aluminija na čelik. Prednosti CMT postupka su: mali unos topline, bez štrcanja, naknadna obrada površine nakon zavarivanja nije potrebna, kontrolirano i točno upravljanje duljinom električnog luka te sposobnost premošćenja kod korijenskog zavora. Nedostatak ovog postupka je što je pri većim strujama zavarivanja (gdje nema prijenosa metala kratkim spojevima) neprimjenjiv. [17,3,22,23]

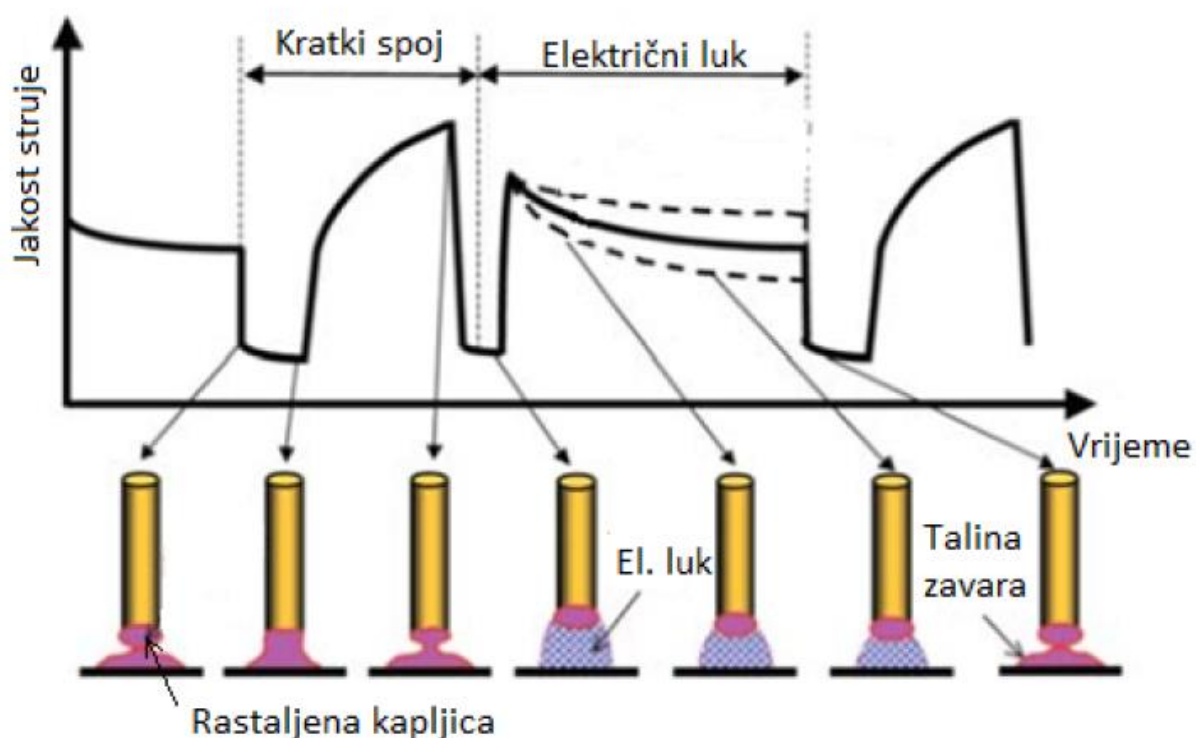
4.1.3. FastROOT®

FastROOT® je modificirani postupak MAG zavarivanja, tvrtke Kemppi, koji se temelji na modificiranom prijenosu metala kratkim spojevima, što rezultira niskim unosom topline. Struja zavarivanja i napon se kontroliraju digitalno. Prijenos metala kod ovog postupka je takav da se nakon prvog stanja kratkog spoja, tijekom kojeg se odvaja kapljica, aktivira drugi strujni interval kojim se zagrijava osnovni materijal i vrh žice, te ih priprema za novi ciklus kratkog spoja. Nakon toga se održava osnovna razina struje koja osigurava stabilnost luka i taline do sljedećeg kratkog spoja. Ovaj način prijenosa metala omogućava brza regulacija struje i napona tijekom cijelog procesa što rezultira eliminacijom štrcanja. Glavna primjena ovog postupka je za zavarivanje korijenskog prolaza gdje se preciznom regulacijom postiže željeni profil zavarenog spoja. Primjenjuje se još, zbog malog unosa topline, i za zavarivanje tankih limova pogotovo u situacijama većeg razmaka između komada. [3,22]

4.1.4. CBT- Controlled bridge transfer®

CBT postupak zavarivanja je inačica MAG zavarivanja koja kombinira prednosti impulsnog i klasičnog MAG zavarivanja. Konvencionalni MAG postupak zavarivanja je vrlo osjetljiv na pojavu štrcanja u području malog unosa topline tj. u području prijenosa metala kratkim spojevima. Pojava štrcanja najčešće je u trenutku neposredno nakon prekida električnog luka tj. pri njegovoj ponovnoj uspostavi. U tom trenutku na kapljicu rastaljenog metala djeluje

„pinch“ efekt te ako se želi smanjiti štrcanje potrebno je precizno odrediti iznos pada napona u trenutku neposredno prije ponovne uspostave luka. Zajedno s padom napona u istom trenutku pada i jakost struje zavarivanja što za posljedicu ima prijenos kapljice s vrha elektrode isključivo pomoću površinske napetosti. Da bi se nadoknadio gubitak energije zbog smanjenja jakosti struje u kratkom spoju i na taj način postigla odgovarajuća veličina kapljice, u trenutku uspostavljanja električnog luka jakost struje zavarivanja naglo poraste. CBT postupak temelji se na preciznom podešavanju jakosti struje optimalno prema varijabilnom parametru, naponu električnog luka. To omogućava upravljanje prijenosom metala tijekom kratkog spoja i stabilizaciju električnog luka. Pomoću toga je moguće precizno nadziranje procesa odvajanja rastaljene kapljice u svrhu predviđanja trenutka pojave kratkog spoja (ponovne uspostave električnog luka). Ova tehnologija rezultira: smanjenjem štrcanja, kontroliranim procesom, manjim unosom topline te mogućnošću zavarivanja materijala tanjih od promjera elektrode. Slika 22. prikazuje princip CBT postupka zavarivanja. [2,24]



Slika 22. Princip CBT postupka zavarivanja [2]

Postoje tri inačice CBT postupka zavarivanja, a to su: EN-CBT, AC-CBT i CBT-EX postupci. EN-CBT (eng. Electrode Negative CBT) je postupak u kojem je žica spojena na negativni pol što omogućuje mali unos topline i smanjenje štrcanja. Pri ovom postupku toplina u žici je veća nego toplina u osnovnom metalu te je brzina taljenja žice veća nego kod običnog CBT postupka tj. za isti depozit pri EN-CBT postupku je manji unos topline. AC-CBT (eng. Alternative Current CBT) je inačica CBT postupka kod kojeg se koristi izmjenična struja male frekvencije. Precizna kontrola karakteristika električnog luka za vrijeme oba polariteta omogućava stabilnost ovog postupka. Prednost ovog postupka je smanjenje penetracije s povećanjem omjera negativnog polariteta. Omogućeno je kontroliranje profila zavara i precizna kontrola unosa topline te višestruko smanjenje štrcanja. CBT-EX (eng. CBT Expanded) je inačica CBT postupka zavarivanja koja je nastala kao odgovor na zahtjeve za većom produktivnošću CBT postupka i većim brzinama zavarivanja uz visoku kvalitetu zavarenog spoja. U ovom postupku pojačavaju se parametri zavarivanja što dovodi do krupnokapljičastog prijenosa metala. Time se poboljšava produktivnost i raste brzina zavarivanja uz smanjenje unosa topline i smanjenje štrcanja. [2,24]

4.2. Modificirani prijenos metala štrcajućim lukom

Modifikacije prijenosa metala štrcajućim lukom posljedica su zahtjeva za boljom penetracijom, većom kvalitetom zavara te boljom produktivnošću uz veći depozit, što je jedna od prednosti klasičnog prijenosa metala štrcajućim lukom. To se postiže skraćanjem električnog luka tj. smanjenjem napona zavarivanja, što dovodi do koncentriranijeg luka i veće penetracije. Na temelju modifikacija prijenosa štrcajućim lukom razvili su se modificirani postupci MAG zavarivanja: RMT[®], ForceArc[®] i PowerMode[®].

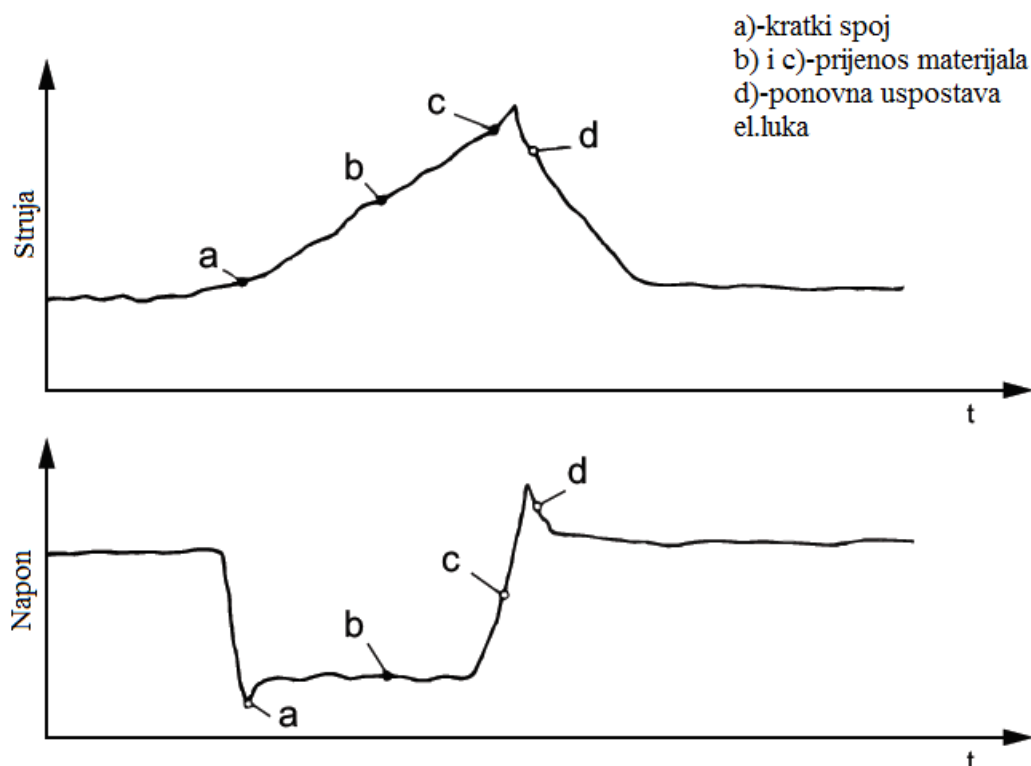
4.2.1. RMT-Rapid MAG Technology[®]

RMT postupak je modificirani postupak MAG zavarivanja koji se bazira na prijenosu metala štrcajućim lukom. Prijenos metala štrcajućim lukom kod konvencionalnog MAG zavarivanja ostvaruje se neprekinutim nizom kapljica čiji je promjer manji od promjera žice. Prijelazna struja kod koje se uspostavlja stabilan štrcajući luk ovisi o vrsti i promjeru dodatnog

materijala te zaštitnom plinu. Vrijednost prijelazne struje pada s povećanjem udjela argona u plinskoj mješavini pa se optimalni prijenos metala štrcajućim lukom odvija u plinskim mješavinama bogatim argonom. Kod RMT postupka prijenos metala u električnom luku zbiva se vrlo malim kapljicama dodatnog materijala, frekvencijom od oko 2-3 kHz. Ovim načinom se sužava jezgra električnog luka, snizuje napon i visina luka u odnosu na konvencionalni način prijenosa štrcajućim lukom, što za posljedicu ima koncentriraniji luk i bolju penetraciju. Prednosti ovog postupka su: pogodnost za zavarivanje debljih materijala, zavarivanje kutnih zavara debljine do 8 mm bez pripreme, smanjenje broja prolaza zbog manjeg kuta pripreme, veće brzine zavarivanja, manji unos topline te smanjeno štrcanje. [5,3,25]

4.2.2. ForceArc®

EWM forceArc je modificirani postupak MAG zavarivanja štrcajućim lukom gdje je luk kraći nego kod konvencionalnog prijenosa štrcajućim lukom. Talina se formira uslijed plazme električnog luka što rezultira stvaranjem malih i srednje velikih kapljica koje se transferiraju kroz električni luk, jedna za drugom, velikom brzinom. Posljedica toga je povremena pojava kratkih spojeva, zbog povremenog, međusobnog doticanja kapljica dodatnog materijala čime se ostvaruje direktan spoj s talinom i nastaje štrcanje. Ovaj postupak, zahvaljujući digitalnoj kontroli i korekciji parametara, pri zavarivanju štrcajućim lukom niskog napona, vrlo brzo smanjuje struju zavarivanja nakon ponovne uspostave električnog luka, dok napon ne postigne nominalnu vrijednost. To uvelike smanjuje vrijeme kratkog spoja i reducira štrcanje na minimum. Daljnje smanjivanje duljine električnog luka tj. napona zavarivanja nije bilo moguće zbog pojave duljih perioda kratkih spojeva i povećanog štrcanja. Slika 23. prikazuje faze EWM forceArc postupka.



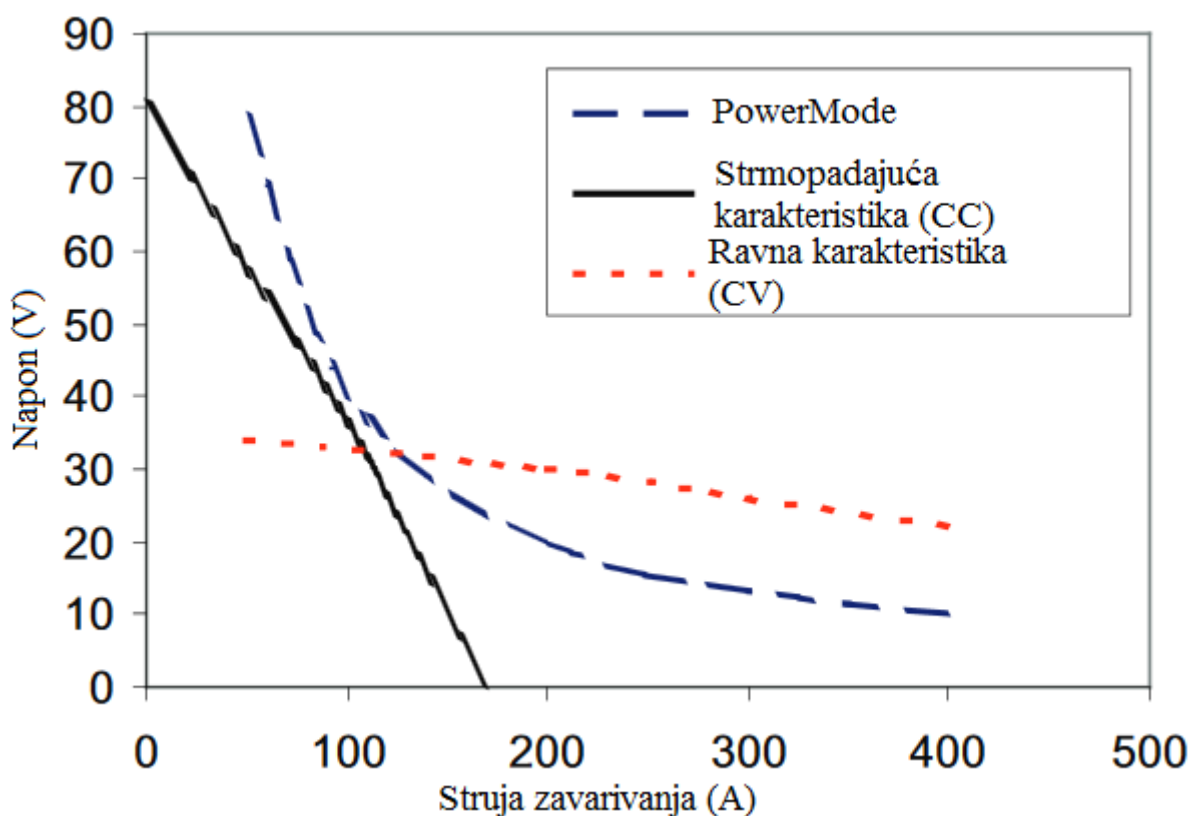
Slika 23. Faze EWM forceArc postupka [26]

Prednosti ovog postupka u odnosu na konvencionalni štrcajući luk su: dobro protaljivanje i penetracija zahvaljujući višem tlaku plazme električnog luka, lakše rukovanje kod ručnog zavarivanja zbog direktno usmjerenog i kraćeg električnog luka, izostanak ugorina zbog kraćeg električnog luka, bolja produktivnost zbog postizanja veće brzine zavarivanja i bolja kvaliteta zavora. Ovaj postupak pogodan je u izgradnji: čeličnih konstrukcija, energetici, brodogradnji, izgradnji vozila i kontejnera, izradi opreme i offshore konstrukcija. [26,27]

4.2.3. PowerMode®

PowerMode® je modificirani postupak MAG zavarivanja temeljen na tehnologiji Waveform Control Technology™ tvrtke Lincoln Electric. Ovaj postupak omogućava stabilan električni luk s jednolikim profilom penetracije. Omogućeno je zavarivanje materijala tanjih i od 0,7 mm. Kontrola procesa omogućava izvoru struje da održava stabilan luk unatoč promjeni u

duljini slobodnog kraja žice čak i pri niskim vrijednostima jakosti struje. Stabilnost električnog luka na vrlo niskim strujama pruža optimalne uvjete za zavarivanje kratkim spojevima uz smanjeno štrcanje. Regulacija električnog luka kod ovog postupka odvija se preko snage električne energije, koja je umnožak struje i napona. Izvor struje reagira na promjene napona u električnom luku, no za razliku od procesa s ravnom karakteristikom, reagira s manjom promjenom struje zavarivanja. PowerMode postupak se na višim strujama zavarivanja, ponaša prema ravnoj karakteristici struje, dok se pri većim naponima ponaša prema strmopadajućoj karakteristici struje. Slika 24. prikazuje ravnu, strmopadajuću te karakteristiku PowerMode postupka.



Slika 24. Prikaz ravne, strmopadajuće i karakteristike PowerMode postupka [28]

Upravo taj način praćenja i regulacije procesa konstantnom snagom omogućava zavarivanje jednolikom i konstantnom penetracijom duž cijele duljine zavara. Prijenos metala u električnom luku vrši se: kratkim spojevima, štrcajućim lukom i mješovitim lukom, ovisno o brzini dodavanja žice i snage koja se definira u programu. [5,28]

5. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada, koji je proveden u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu, analizirane su: mogućnosti izbora parametara primjenom sinergijske upravljačke karakteristike, dinamičke karakteristike pojedinih specifičnih funkcija u usporedbi s konvencionalnim MAG postupkom te geometrija zavora dobivena pojedinom funkcijom u odnosu na konvencionalni MAG postupak.

5.1. Plan eksperimenta

Eksperiment je zamišljen tako da se snimaju dinamičke karakteristike konvencionalnog MAG zavarivanja te specifičnih funkcija, uz iste parametre zavarivanja. Analizirane su specifične funkcije: Arc control, Constant penetration i Low spatter. Razlike u dinamičkim karakteristikama analizirane su i na temelju njih kvantificirani su utjecaji pojedinih funkcija na stabilnost procesa. Za odabrane funkcije napravljeni su makroizbrusci pomoću kojih je analiziran utjecaj specifičnih funkcija na geometriju zavora. Pri eksperimentalnom radu korišten je inverterski izvor struje za zavarivanje OTC Daihen Welbee P500L. Slika 25. prikazuje radno mjesto na kojem je proveden eksperimentalni dio rada. Na slici je vidljiv stroj za zavarivanje, koji sadrži navedeni izvor struje te oprema potrebna za snimanje dinamičke karakteristike.



Slika 25. Radno mjesto u Laboratoriju za zavarivanje, FSB, Zagreb

5.1.1. Izvor struje za zavarivanje-OTC Daihen Welbee P500L

OTC Daihen Welbee P500L (Slika 26.) je inverterski izvor struje za zavarivanje, najnovije generacije, koji je proizvela tvrtka OTC Daihen. Pri kontroli elektrolučnog zavarivanja koristi nanotehnološki procesor Welbee. Koristi se za optimalno, elektrolučno, zavarivanje: konstrukcijskog čelika, nehrđajućeg čelika i aluminija. Ovaj izvor struje za zavarivanje smješten je u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu i redovno se koristi u nastavne i istraživačke svrhe. Tablica 3. prikazuje specifikaciju korištenog izvora struje za zavarivanje.



Slika 26. Izvor struje OTC Daihen Welbee P500L

Tablica 3. Specifikacija izvora struje OTC Daihen Welbee P500L [29]

Model	WB-P500L	
Broj faza	3	
Priključni napon	400 V \pm 15%	
Nazivna snaga (ulazna)	25 kVA, 22,9 kW	
Vrsta struje	DC	Impulsna
Struja zavarivanja	30 – 500A	30 – 400A
Intermitencija	60%	80%
Napon zavarivanja	12 – 39V	12 – 34V
Dimenzije (Š*D*V)	395 mm * 710 mm * 762 mm	
Masa	83 kg	
Statička karakteristika	CV	

5.1.1.1. Mogućnosti podešavanja parametara primjenom sinergijske upravljačke karakteristike

Izvor struje za zavarivanje OTC Daihen Welbee P500L, kao i svi izvori struje za zavarivanje najnovije generacije, ima mogućnost podešavanja parametara uz pomoć sinergijskih krivulja. Uz mogućnost podešavanja parametara pomoću sinergijskih krivulja zadržana je i mogućnost klasičnog podešavanja parametara zavarivanja (odvojeno podešavanje struje zavarivanja i napona). Na ovom izvoru struje za zavarivanje odabir načina podešavanja parametara moguće je postaviti jednostavnim pritiskom na tipku kojom se onda odabire klasični način podešavanja parametara ili podešavanje parametara primjenom sinergijskih krivulja. Slika 27. prikazuje sučelje za podešavanje načina rada i parametara na izvoru struje OTC Daihen Welbee P500L.



Slika 27. Sučelje za podešavanje načina rada i parametara na izvoru struje OTC Daihen Welbee P500L

Na Slici 27. crvenom kružnicom označena je tipka za odabir načina podešavanja parametara zavarivanja. Crvena LED lampica iznad tipke označava da je odabrano podešavanje

parametara primjenom sinergijskih krivulja što je i korišteno u eksperimentalnom radu. Kad je uključeno podešavanje parametara primjenom sinergijskih krivulja, dovoljno je odabrati postupak zavarivanja, vrstu osnovnog materijala (preko odabira dodatnog materijala), promjer dodatnog materijala, vrstu zaštitnog plina i postaviti struju zavarivanja (brzinu dodavanja žice) i ostali parametri zavarivanja automatski se podese. Slijedećih nekoliko slika (Slike 28.-31.) prikazuju promjenu parametara zavarivanja kada se vrsta dodatnog materijala mijenja.



Slika 28. Parametri zavarivanja za konstrukcijski čelik

Slika 28. prikazuje parametre koji su definirani za konvencionalno MAG zavarivanje koji su korišteni u eksperimentalnom radu i koje je osnova za analizu specifičnih funkcija izvora struje za zavarivanje OTC Daihen Welbee P500L.



Slika 29. Parametri zavarivanja pri zavarivanju nehrđajućeg čelika

Iz Slike 29. vidljivo je da se promjenom dodatnog materijala (konstrukcijski čelik u nehrđajući čelik), uz zadanu struju zavarivanja (150A) i promjer dodatnog materijala, mijenjaju napon zavarivanja i zaštitni plin.



Slika 30. Parametri zavarivanja pri zavarivanju feritnog nehrđajućeg čelika

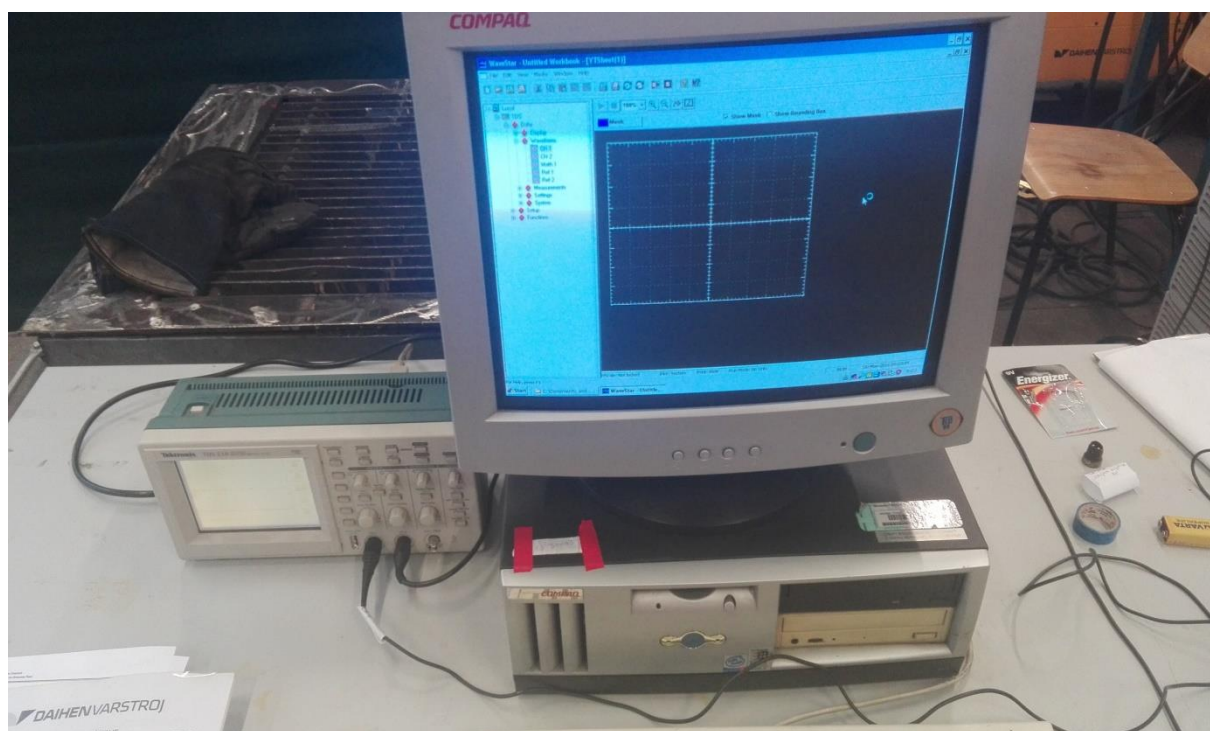


Slika 31. Parametri zavarivanja pri zavarivanju nehrđajućeg čelika praškom punjenom žicom

Slike 28.-31. prikazuju kako se mijenjaju parametri promjenom vrste dodatnog materijala. Na isti način se parametri mijenjaju i promjenom nekog drugog parametra (promjer dodatnog materijala, vrsta plina, postupak zavarivanja).

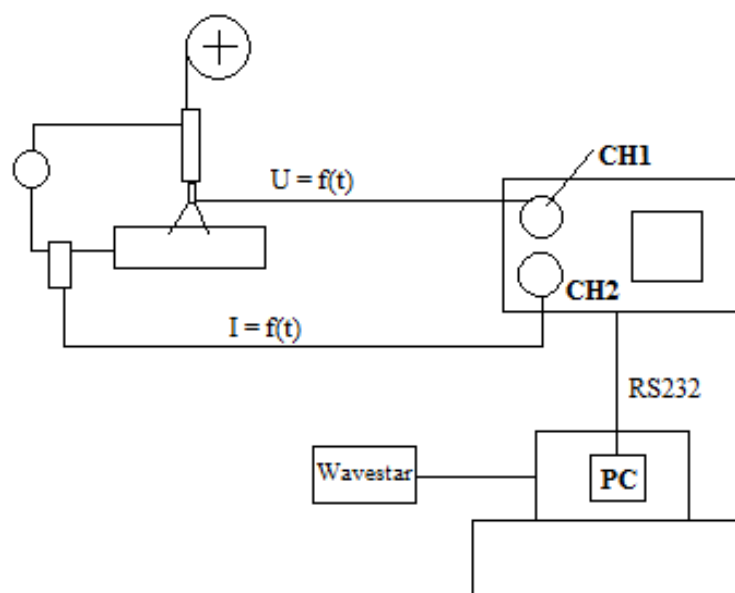
5.1.2. Oprema za snimanje dinamičke karakteristike

Oprema za snimanje dinamičke karakteristike sastoji se od osciloskopa Tektronix TDS 210 te računala za analizu i obradu podataka dobivenih osciloskopom. Za analizu i obradu podataka na računalu potreban je program Wavestar™. Slika 32. prikazuje opremu za snimanje i analizu dinamičke karakteristike.



Slika 32. Osciloskop Tektronix TDS 210 i računalo s programom Wavestar™

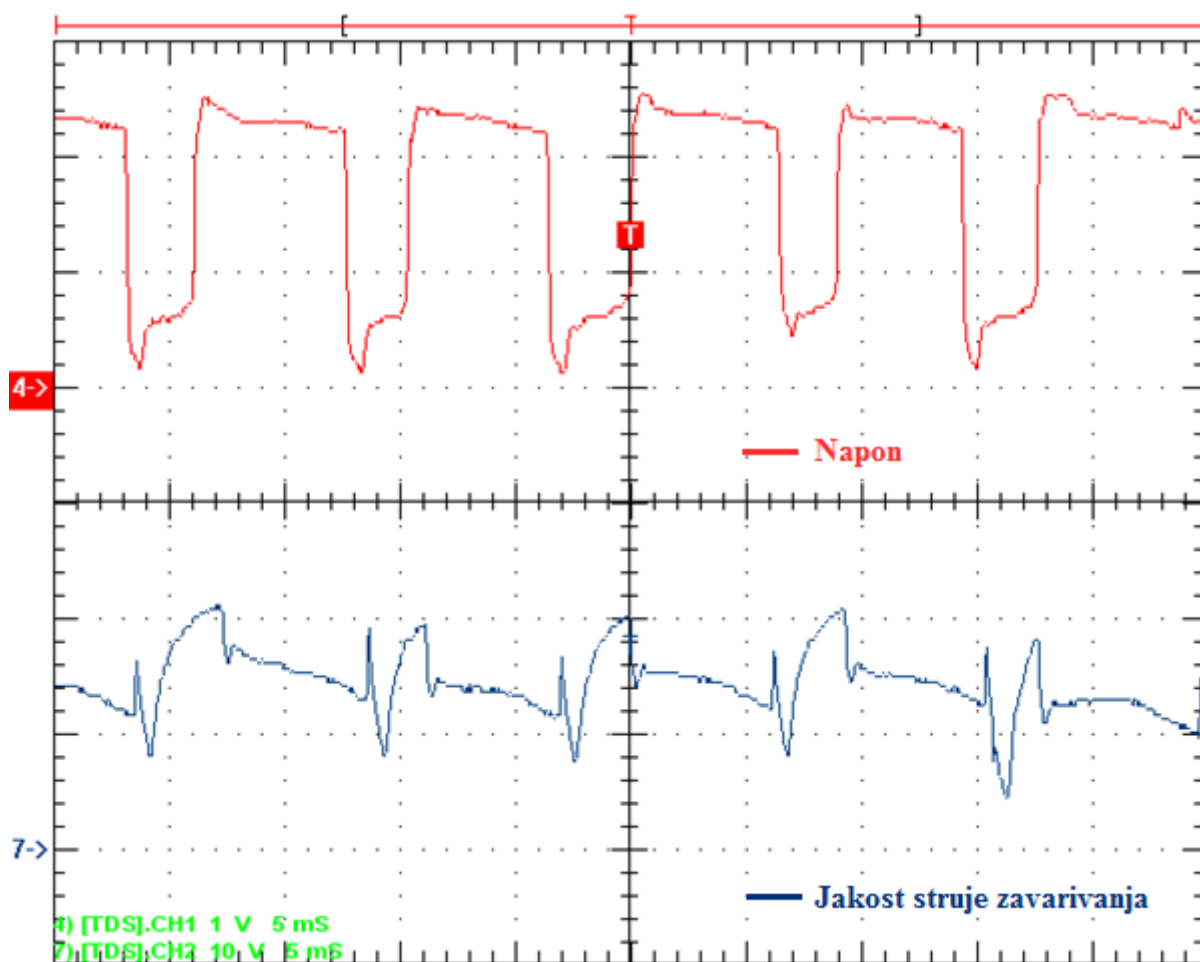
Osciloskop Tektronix TDS 210 je dvokanalni osciloskop (dvokanalni zbog snimanja napona i struje zavarivanja) koji nudi veliko frekvencijsko područje, automatizaciju mjernih značajki i vrlo jednostavno korištenje. Ulazni kanali se kontroliraju odvojeno. Slika 33. prikazuje shemu spajanja osciloskopa, izvora struje i računala na kojem je program Wavestar™.



Slika 33. Shema spajanja mjerne opreme [2]

5.1.2.1. Dinamička karakteristika

Dinamička karakteristika je operativna karakteristika mjerena osciloskopom, pod konstantnim opterećenjem izvora struje za zavarivanje u svrhu detaljnog promatranja ponašanja električnog luka. Mjerenje dinamičke karakteristike generalno se povezuje s MIG/MAG postupcima zavarivanja gdje je kombinacijom parametara zavarivanja moguće dobiti različite prijenose metala u električnom luku. Dinamička karakteristika je odnos struje i napona koji se dobije tijekom zavarivanja tj. prikaz promjene napona i struje kod određenog praktičnog zavarivanja. Ovisno o postupku zavarivanja, registriraju se promjene napona i struje zavarivanja. [3,30]



Slika 34. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i = f(t)$, MAG postupka zavarivanja

Slika 34. prikazuje oscilogram dinamičke karakteristike MAG postupka zavarivanja, dobivenu u sklopu eksperimentalnog dijela diplomskog rada. Na slici je crvenom bojom označen napon, dok je plavom bojom označena jakost struje zavarivanja. Karakteristika sa slike snimljena je uz pomoć ranije navedene opreme za snimanje dinamičkih karakteristika i obrađena u programu Wavestar™. Uz pomoć dinamičkih karakteristika omogućeno je promatranje postupka zavarivanja te mjerenje neke karakteristične vrijednosti (vrijednosti jakosti struje, napona, vremena trajanja pojedinih faza električnog luka i sl.) te na temelju njih analizirati postupak zavarivanja.

5.1.3. Ostala oprema

Od ostale opreme korišten je modularni sustav pogona s jedinicom glavnog pogona MDS-1002 proizvođača Bug-O Systems koji služi za automatizirano zavarivanje s konstantnim smjerom i brzinom zavarivanja. Slika 35. prikazuje modularni sustav pogona s postavljenim pištoljem za zavarivanje korišten u eksperimentalnom radu. [31]



Slika 35. Modularni sustav pogona MDS-1002

5.2. Eksperiment

U eksperimentu je provedeno navarivanje konvencionalnim MAG postupkom i MAG postupkom s uključenim specifičnim funkcijama izvora struje za zavarivanje, na osnovnom materijalu oznake S235, debljine 10 mm, u zaštitnoj atmosferi plina, trgovačkog imena, Ferroline C18. Tijekom navarivanja snimane su dinamičke karakteristike pojedinih procesa. Nakon što su snimljene sve, za analizu, potrebne dinamičke karakteristike, izrezani su uzorci za analizu makroizbrusaka. Uslijedila je priprema uzoraka te analiza dobivenih makroizbrusaka. U nastavku će biti, ukratko, opisani: osnovni materijal, zaštitni plin i postupak pripreme uzoraka za analizu makroizbrusaka, koji su isti za sve korištene inačice MAG postupka zavarivanja.

5.2.1. Osnovni materijal

Osnovni materijal, oznaka S235 (prema normi *HRN EN 10027-1:2007-Sustavi označivanja za čelike-1. dio: Nazivi čelika*), je konstrukcijski čelik čija je minimalna granica elastičnosti u području najmanjih debljina 235 N/mm². Ovaj čelik prema normi HRI TR ISO 15608, spada u grupu 1.1. Kemijski sastav ovog čelika prikazan je u Tablici 4. dok su njegova mehanička svojstva prikazana u Tablici 5. Ovaj čelik ima vrlo široku primjenu.

Tablica 4. Kemijski sastav čelika S235 [32]

Element	C	Mn	P	S	Si	N	Cu
Udio, %	≤ 0,22	≤ 1,4	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,012	≤ 0,55

Tablica 5. Mehanička svojstva čelika S235 za debljinu 10 mm [32]

Granica razvlačenja Re, N/mm ²	Vlačna čvrstoća Rm, N/mm ²	Udarni rad loma KV, J	Istezljivost A, %
		JR (+ 20 °C)	
235	360-510	27	26

5.2.2. Zaštitni plin

Zaštitni plin, trgovačkog imena, Ferroline C18, korišten u eksperimentalnom radu, je plinska mješavina oznake M21 (prema normi *EN ISO 14175:2008 Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje-plinovi i plinske mješavine za zavarivanje i srodne postupke*) koji sadrži 82% argona i 18% CO₂. Ova plinska mješavina koristi se za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika, širokog raspona debljina, MAG postupkom zavarivanja.

Odabir zaštitnog plina za željenu aplikaciju je ključno za kvalitetu zavarenog spoja jer on utječe na mehanička i metalurška svojstva zavarenog spoja. Vrš se na temelju mnogo kriterija od kojih su neki: vrsta dodatnog materijala, željena mehanička svojstva zavarenog spoja, debljina osnovnog materijala, priprema zavora, stanje osnovnog materijala (korozija, antikorozivne prevlake, masnoće), željeni način prijenosa metala u električnom luku, položaj zavarivanja, željeni profil zavora itd. [1]

Protok zaštitnog plina tijekom eksperimentalnog rada bio je 18 l/min.

5.2.3. Dodatni materijal

Kao dodatni materijal pri izradi eksperimentalnog rada, korištena je puna žica proizvođača Elektroda Zagreb d.d. trgovačkog imena EZ-SG 2 te oznake G 42 4 C/M 3Si1 (prema normi *HRN EN ISO 14341:2012 Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje – Žičane elektrode i depoziti za elektrolučno zavarivanje metalnom taljivom elektrodom u zaštiti plina za nelegirane i sitnozrnate čelike: Razredba.*) promjera 1,2 mm. Na slici 36. prikazana je

specifikacija dodatnog materijala. Na specifikaciji je vidljiv kemijski sastav dodatnog materijala te očekivana mehanička svojstva metala zavarara. Brzina dodavanja dodatnog materijala tj. žice mijenjala se, automatski, s promjenom jakosti struje zavarivanja koja se, tijekom eksperimentalnog rada, podešavala na izvoru struje za zavarivanje.

NORME

HRN EN ISO 14341-A	AWS / ASME SFA-5.18	DIN 8559	W. Nr.
G 42 4 C/M 3Si1	ER70S-6	SG 2	1.5125

SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE

Pobakrena ili pobrončana žica za zavarivanje u zaštitnoj atmosferi plina CO₂ ili mješavine plinova Ar/CO₂. Za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čvrstoće do 590 N/mm².

Grupa čelika	HRN (stari)	DIN (W. Nr.)	HRN / EN / ISO
Konstruktivski čelici	Č 0261 do Č 0545	St 33 (1.0035) do St 52-2N (1.0050)	S 185 do E 295 Fe 310-0 do Fe 490-2
Kotlovski čelici	Č 1202 Č 1204 Č 3133 Č 3105	HI (1.0345) HII (1.0425) 17Mn4 (1.0481) 19Mn6 (1.0473)	P235GH P265GH P295GH P355GH
Čelici za cijevi	Č 1212 do Č 3100	St 35.4 (1.0309) do St 52.4 (1.0581) StE 210.7 (1.0307) do StE 360.7 (1.0582)	DX55D do P355T2 L210 do L360NB
Brodski čelici	A, B, D, E AH 32 do EH 36	A, B, D, E AH 32 do EH 36	
Sitnozrnati čelici	ČRO 250 do ČRO 350 ČRV 250 do ČRV 350	StE 285 (1.0486) StE 355 (1.0562) WStE 285 (1.0487) WStE 355 (1.0565)	P275N P355N P275NH P355NH
Čelični ljev	ČL 0300 do ČL 0500	GS-38 (1.0416) do GS-52 (1.0551)	C18D do S355JRC

MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA

R _{eL} N/mm ²	R _m N/mm ²	A ₅ %	KV (-40°C) J
> 430	500 - 640	> 22	≥ 47

ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ŽICE

C	Mn	Si	Cu
% 0,06 - 0,13	1,4 - 1,6	0,7 - 1,0	≤ 0,3

ZAŠTITNI PLIN

C1 ili M21

PAKIRANJE

Promjer žice mm	Namotaj
0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,6	Slobodan (S-L); žica do žice (S-S)

1 kg - plastični kolut (promjer žice 0,6 i 0,8 mm)
5 kg - plastični kolut (promjer žice 0,6 i 0,8 mm)
15 kg - plastični (S-L ili S-S) ili žičani kolut (S-S) (promjer žice 0,8; 1,0; 1,2 i 1,6 mm)
250 kg - bačva (promjer žice 0,8; 1,0 i 1,2 mm)

ODOBRENJA

ABS (3YSA); BV (SA 3Y M); CRS (3YS); DB; DNV (IIYMS); GL (3YS); LR (3S,3YS);
RINA (3YS); TÜV

= +

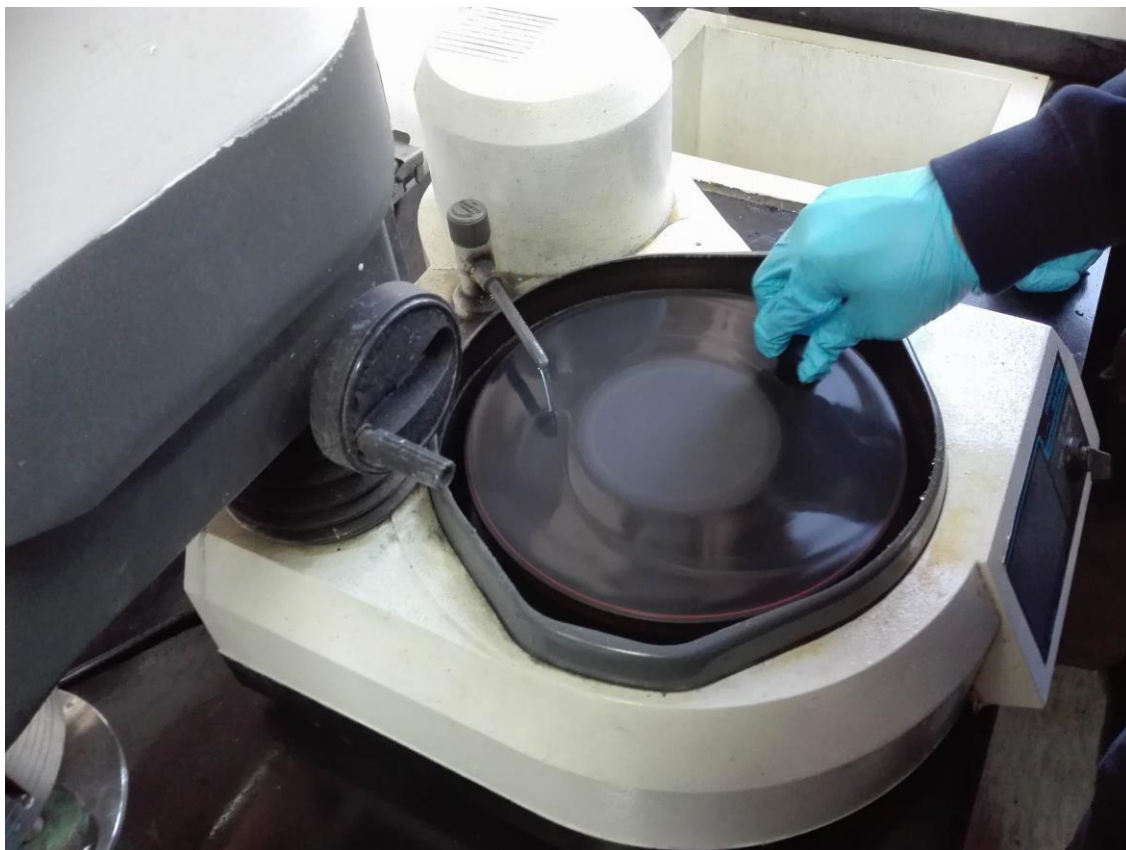
Slika 36. Specifikacija dodatnog materijala [33]

5.2.4. Postupak pripreme uzoraka za analizu makroizbrusaka

Analiza makroizbrusaka je vrlo bitan dio eksperimentalnog rada jer nam daje uvid u geometriju zavarenog spoja, zonu utjecaja topline te nam ukazuje na, eventualne, pogreške prilikom postupka zavarivanja. Nakon zavarivanja, a prije analize, potrebno je uzorke izrezati i pripremiti ih za analizu. Priprema uzoraka sastoji se od brušenja do željene kvalitete i nagrivanja.

5.2.4.1. Brušenje uzoraka

Brušenje je vrlo precizan postupak obrade odvajanjem čestica koji se upotrebljava pretežito za završnu obradu pretežito tvrdih površina, ravnog, cilindričnog ili složenog oblika. Rezne oštrice nalaze se na brusnim zrnima, koji su nedefinirane geometrije. Uzorci analizirani u eksperimentalnom radu brušeni su na automatskoj polirki Buehler (Slika 37.) brusnim papirima granulacija: p320, p500, p1000, p2000 i p4000 (p4000 je brusni papir najsitnije granulacije) pri brzini vrtnje $v=300 \text{ min}^{-1}$. Pri brušenju uzoraka korišteno je vodeno hlađenje. Nakon brušenja uzorci se ispiru i suše.



Slika 37. Automatska polirka Buehler

5.2.4.2. Nagrizanje

Nagrizanje je postupak koji se provodi nakon postupka brušenja/poliranja. To je postupak selektivnog korodiranja površine s namjerom da se istakne mikrostruktura uzoraka i očisti površina uzoraka od nečistoća. U eksperimentalnom radu nagrizanje je korišteno za čišćenje i odmašćivanje površina koje su analizirane. Nagrizanjem postanu vidljivi: profil zavarenog spoja i zona utjecaja topline, dok se pod mikroskopom mogu vidjeti kristalna zrna i ostale karakteristike materijala nevidljive u nenagriženom stanju. Nagrizanje je provedeno u 3%-tnoj otopini nitala (3%-tna otopina dušične kiseline u alkoholu) pri sobnoj temperaturi. Uzorci su držani u sredstvu za nagrizanje nekoliko sekundi nakon čega su uronjeni u vodu (da bi se prekinula reakcija) te nakon toga isprani i posušeni. Tako pripremljeni uzorci spremni su za analizu makrostrukture.

5.3. Analiza funkcije Arc control

Arc control je jedna od specifičnih funkcija izvora struje za zavarivanje, OTC Daihen Welbee P500L, koja je analizirana u eksperimentalnom radu. Pomoću ove funkcije podešava se induktivitet i to stupnjevito u rasponu od -10 do +10 (0 je normalna vrijednost). Podešavanje induktiviteta ima značajan utjecaj na prijenos metala kratkim spojevima. Povećanjem induktiviteta smanjuje se frekvencija kapljica u prijenosu metala kratkim spojevima. Također induktivitetom se opisuje brzina porasta jakosti struje unutar vremenskog perioda, nakon ostvarivanja kratkog spoja. Pri niskom induktivitetu struja brže dostiže željenu vrijednost, dok kod visokog induktiviteta ona sporije raste. Dinamičke karakteristike za analizu ove specifične funkcije snimane su tijekom navarivanja navara oznaka 3, 4 i 5. Za navarivanje navara oznaka 3, 4 i 5 postavljena je jakost struje zavarivanja od 150 A, prema kojoj su (preko sinergijskih upravljačkih krivulja) podešeni i ostali parametri zavarivanja. Napon podešen preko sinergijske krivulje, s obzirom na postavljenu jakost struje zavarivanja, iznosio je 17 V dok je brzina dodavanja žice iznosila 3,5 m/min. Brzina navarivanja bila je konstantna i iznosila je 26 cm/min. Slobodni kraj žice iznosio je 15 mm. Navarivanje je provedeno u zaštitnoj atmosferi plina s 82% argona i 18% CO₂, čiji je protok iznosio 18 l/min. Navarivalo se neutralnom tehnikom zavarivanja. Također, podešene su i vrijednosti funkcije Arc control i to: neutralni slučaj (kada je vrijednost 0), maksimalna pozitivna vrijednost (+10) i maksimalna negativna vrijednost (-10). Navar oznake 3 je dobiven konvencionalnim MAG postupkom, prijenosom metala kratkim spojevima, pri čemu nije korištena funkcija Arc control tj. njena vrijednost je bila 0. On služi kao referentni uzorak za procjenu mogućnosti ove specifične funkcije. Tablica 6. prikazuje promjenjive parametre zavarivanja pri snimanju dinamičkih karakteristika funkcije Arc control.

Tablica 6. Parametri zavarivanja pri snimanju dinamičkih karakteristika funkcije Arc control

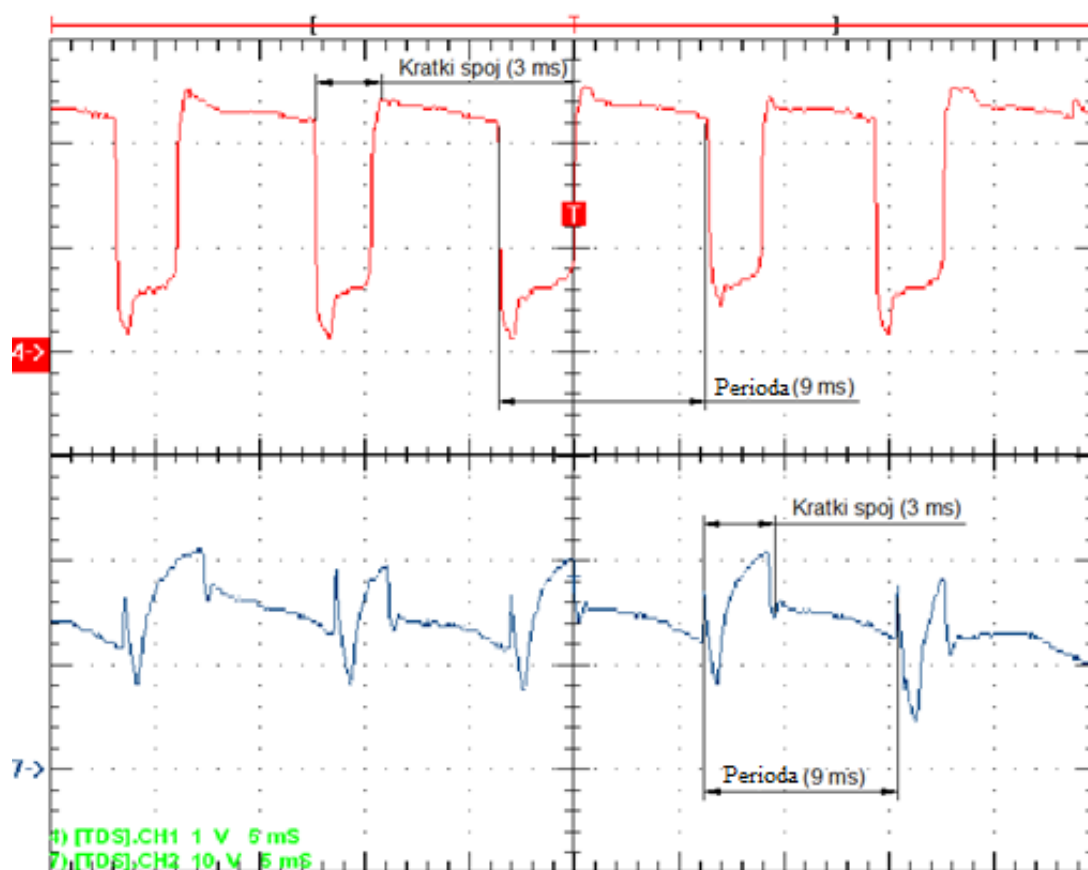
Oznaka navara	Očitane vrijednosti (tijekom navarivanja)		Postavljena vrijednost funkcije Arc control
	Jakost struje zavarivanja, A	Napon, V	
3	148	16,8	0
4	146	18	-10
5	144	17,5	+10

U Tablici 6. vidljivi su promjenjivi parametri zavarivanja korišteni pri snimanju dinamičkih karakteristika funkcije Arc control, ovisno o njevoj postavljenoj vrijednosti. Slika 38. prikazuje navare 3, 4 i 5 dobivene korištenjem različitih vrijednosti funkcije Arc control. Oznake navara identične su onima iz Tablice 6.



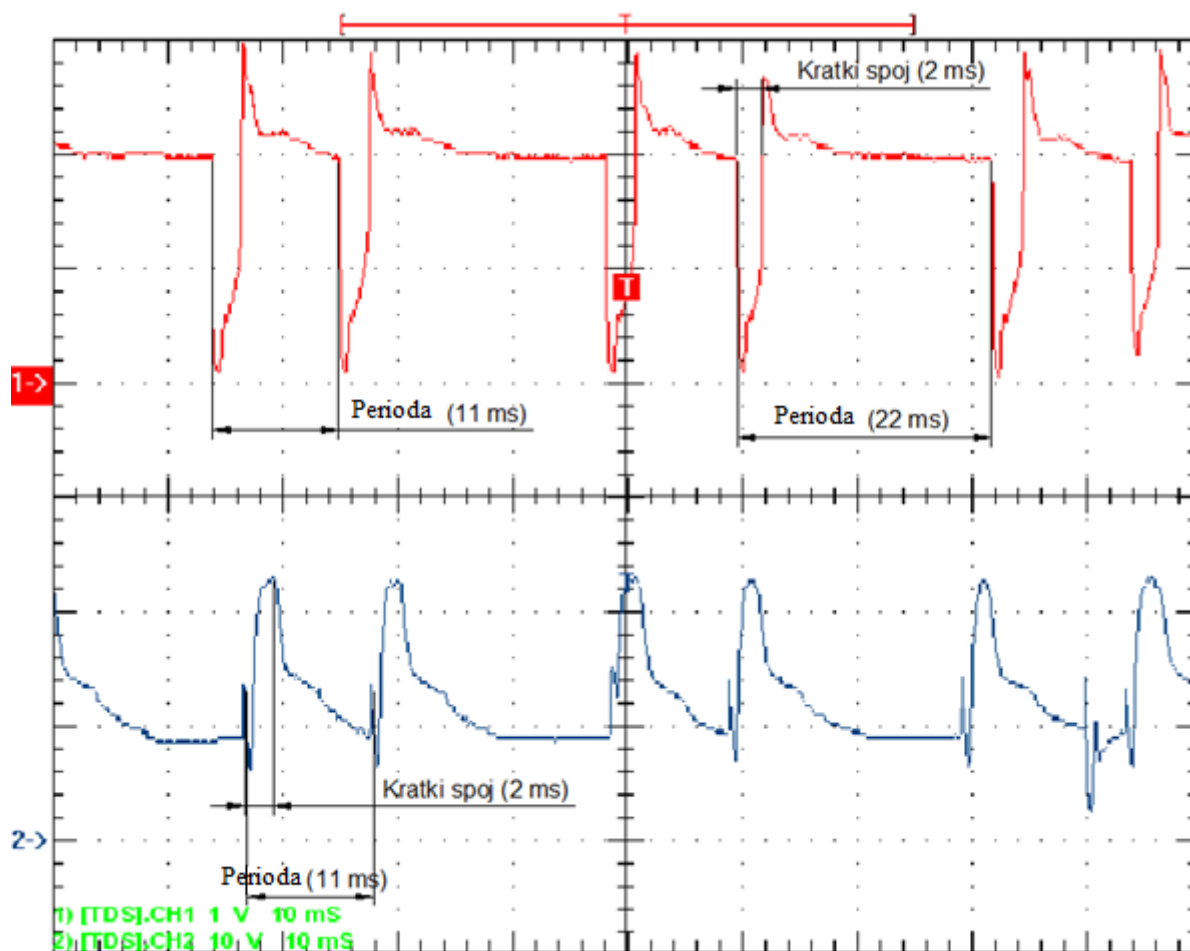
Slika 38. Navari dobiveni primjenom funkcije Arc control

Iz slike 38. vidljivo je da je prijenos metala kratkim spojevima, uz korištenje funkcije Arc control tj. njene maksimalne pozitivne i maksimalne negativne vrijednosti, dosta nestabilan što je vidljivo po velikom broju kapljica koje su štrcale tijekom navarivanja i ostale na osnovnom materijalu. Vidljivo je također da su kod navara pod oznakom 4 (vrijednost funkcije Arc control je -10) te kapljice manje i puno više ih ima, što ukazuje na to da je frekvencija kapljica pri prijenosu kratkim spojevima bila veća, dok su kod navara pod oznakom 5 (vrijednost funkcije Arc control +10) te kapljice veće i ima ih manje. To potvrđuje utjecaj promjene induktiviteta na frekvenciju prijenosa kapljica u električnom luku, koja je opisana u teoretskom dijelu rada. Slike 39., 40. i 41. prikazuju snimljene oscilogramе dinamičke karakteristike struje i napona pri navarivanju uz korištenje funkcije Arc control. Slika 39. odnosi se na dinamičku karakteristiku dobivenu bez upotrebe funkcije Arc control (zavareni spoj oznake 3), Slika 40. odnosi se na dinamičku karakteristiku dobivenu uz maksimalnu negativnu vrijednost funkcije Arc control (zavareni spoj oznake 4) i Slika 41. odnosi se na dinamičku karakteristiku dobivenu uz maksimalnu pozitivnu vrijednost funkcije Arc control (zavareni spoj oznake 5).



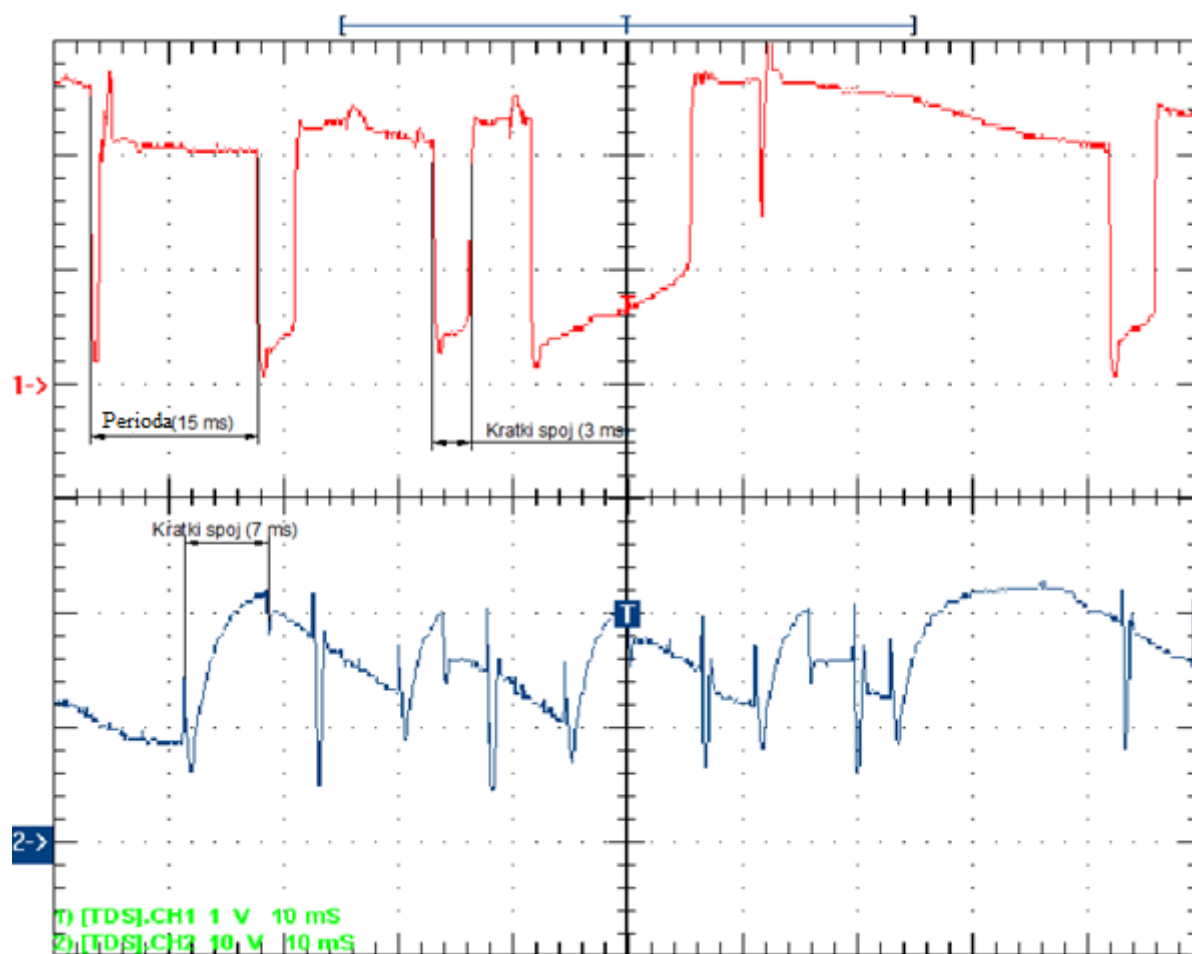
Slika 39. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i = f(t)$, pri MAG zavarivanju bez uključene funkcije Arc control

Slika 39. prikazuje dinamičke karakteristike struje i napona konvencionalnog MAG zavarivanja u slučaju isključene specifične funkcije Arc control tj. kad je njena vrijednost jednaka 0. Na slici su jasno vidljivi periodi kratkog spoja koji traju 3 ms te periodi električnog luka koji traju 6 ms. Pravilne periode (u trajanju od 9 ms), razmaci između njih i oblici dinamičkih karakteristika upućuju na stabilan proces zavarivanja. Također, može se zaključiti da izvor struje za zavarivanje dolazi s optimalno podešenom vrijednošću funkcije Arc control.



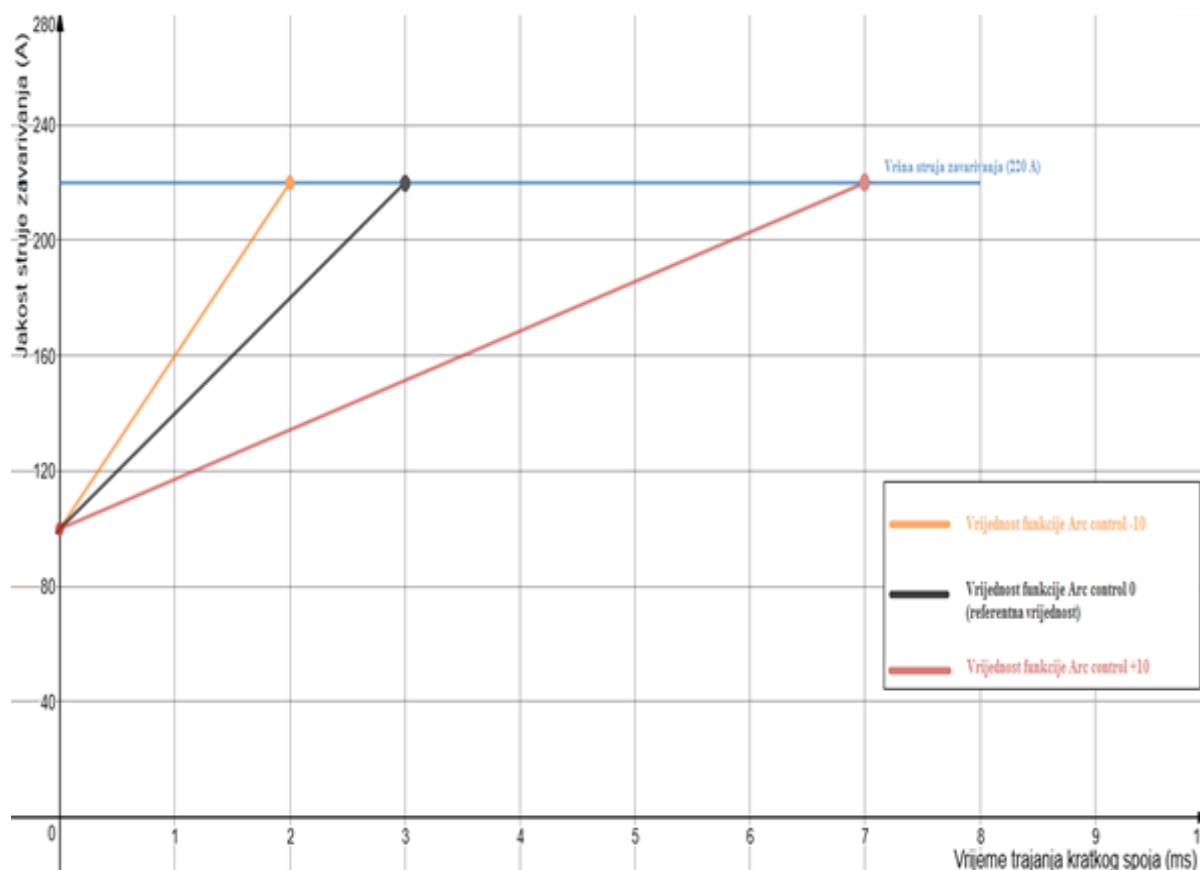
Slika 40. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i = f(t)$, pri MAG zavarivanju uz uključenu funkciju Arc control i postavljenu vrijednost -10

Iz Slike 40. vidljivo je da je porast struje za vrijeme kratkog spoja brži, što za posljedicu ima skraćanje perioda kratkog spoja (2 ms) u odnosu na referentni slučaj (3 ms). Ovo je i očekivano s obzirom da je podešena vrijednost funkcije Arc control iznosila -10 tj. manji iznos induktiviteta. No, iz oscilograma je vidljivo da proces više nije toliko stabilan te da je trajanje nekih perioda i do dva puta dulje od ostalih. Vremena trajanja perioda kreću se između 11 i 22 ms što ukazuje na nestabilnost procesa i neravnomjeran unos topline.



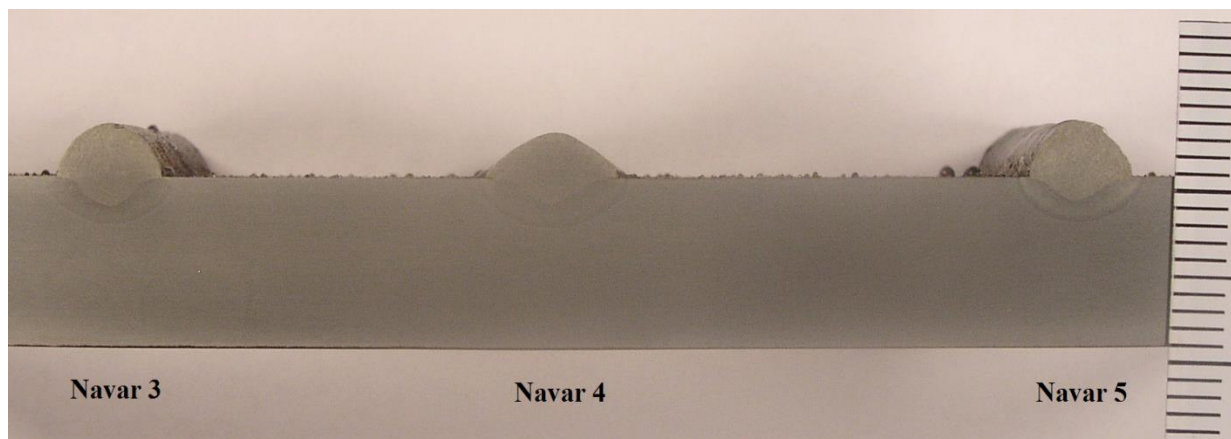
Slika 41. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i = f(t)$, pri MAG zavarivanju uz uključenu funkciju Arc control i postavljenu vrijednost +10

Na dinamičkim karakteristikama struje i napona, iz Slike 41., vidljivo je da su trajanja perioda i razmaci između njih dosta nepravilni što za posljedicu ima nestabilnost električnog luka. Također je, na dinamičkoj karakteristici struje, vidljivo da zbog porasta induktiviteta brzina porasta jakosti struje pada te se vrijeme trajanja perioda kratkog spoja produljilo na 7 ms što je znatno povećanje u odnosu na referentni slučaj gdje je iznosilo 3 ms. Usporedbom dinamičkih karakteristika na slikama 39., 40. i 41. može se zaključiti da se postiže očekivani učinak promjene brzine porasta jakosti struje, do željene vrijednosti, preko promjene induktiviteta. Također je vidljivo da je promjenom induktiviteta, u ekstremno postavljenim uvjetima rada, narušena stabilnost električnog luka što u postupku zavarivanja nije poželjno. Slika 42. prikazuje ovisnost brzine porasta struje (do vršne vrijednosti) o postavljenoj vrijednosti funkcije Arc control.



Slika 42. Ovisnost brzine porasta struje o vrijednosti funkcije Arc control

Na slici 42. vidljivo je da smanjenjem induktiviteta (vrijednost funkcije Arc control -10) struja brže postiže svoju vršnu vrijednost i tajanje kratkog spoja je kraće (2 ms), dok se povećanjem induktiviteta (vrijednost funkcije Arc control +10) vršna vrijednost sporije dostiže te je trajanje kratkog spoja duže (7 ms). Slika 43. prikazuje makroizbrusak na kojem su vidljivi profili navara oznaka 3, 4 i 5.



Slika 43. Makroizbrusak navara 3, 4 i 5

Makroizbrusak na slici 43. analiziran je uz pomoć programa ImageJ te su u tablici 7. prikazane izmjerene vrijednosti profila navara 3, 4 i 5.

Tablica 7. Izmjerene vrijednosti profila navara 3, 4 i 5

Oznaka navara	Širina navara, mm	Dubina penetracije, mm	Nadvišenje navara, mm
3	6,6	1,6	3
4	8,4	1,4	2,7
5	6,1	1,4	3,4

Iz Tablice 7. vidljivo je da se dubina penetracije smanjila uz korištenje funkcije Arc control te da su profili navara kod sva tri zavarena spoja različiti. Analizom funkcije Arc control vidljivo je da je promjenom induktiviteta moguće utjecati na stabilnost procesa te na geometriju zavora/navara. O tome treba voditi računa pri definiranju parametara, ovisno o tome što je potrebno postići.

5.4. Analiza funkcije Constant penetration

Funkcija Constant penetration je, također, jedna od specifičnih funkcija izvora struje za zavarivanje, OTC Daihen Welbee P500L, koja je analizirana u eksperimentalnom radu. Radi se o specifičnoj funkciji koja omogućava konstantnu penetraciju unatoč promjeni duljine slobodnog kraja žice što se postiže dodatnom regulacijom brzine dodavanja žice. Ovo je jedna od dodatnih funkcija koja služi za eliminaciju utjecaja slobodnog kraja žice. Dinamičke karakteristike za analizu ove specifične funkcije snimane su tijekom navarivanja navara oznaka 1, 2, 6 i 7. Za navarivanje navara oznaka 1, 2, 6 i 7 postavljena je jakost struje zavarivanja od 150 A, prema kojoj su (preko sinergijskih upravljačkih krivulja) podešeni i ostali parametri zavarivanja. Napon podešen preko sinergijske krivulje, s obzirom na postavljenu jakost struje zavarivanja, iznosio je 17 V dok je brzina dodavanja žice iznosila 3,5 m/min. Brzina navarivanja bila je konstantna i iznosila je 26 cm/min. Navarivanje je provedeno u zaštitnoj atmosferi plina s 82% argona i 18% CO₂, čiji je protok iznosio 18 l/min. Navarivalo se neutralnom tehnikom zavarivanja. Navar oznake 1 je navar dobiven konvencionalnim MAG postupkom, prijenosom metala kratkim spojevima, pri čemu nije korištena funkcija Constant penetration te služi kao referentni uzorak za procjenu mogućnosti ove specifične funkcije. Tablica 8. prikazuje promjenjive parametre zavarivanja pri snimanju dinamičkih karakteristika funkcije Constant penetration.

Tablica 8. Parametri zavarivanja pri snimanju dinamičkih karakteristika funkcije Constant penetration

Oznaka navara	Očitane vrijednosti (tijekom navarivanja)		Funkcija Constant penetration	Slobodni kraj žice, mm
	Jakost struje zavarivanja, A	Napon, V		
1	148	16,8	isključena	15
2	138	17,3	uključena	15
6	115	18,3	isključena	30
7	116	18,3	uključena	30

U Tablici 8. vidljivi su promjenjivi parametri tijekom navarivanja i snimanja dinamičkih karakteristika funkcije Constant penetration, ovisno o promjeni duljine slobodnog kraja žice i o tome da li je uključena ili isključena. Slike 44. i 45. prikazuju navare 1, 2, 6 i 7 dobivene pri korištenju funkcije Constant penetration i snimanju njenih dinamičkih karakteristika. Oznake na slici identične su oznakama navara u Tablici 8.

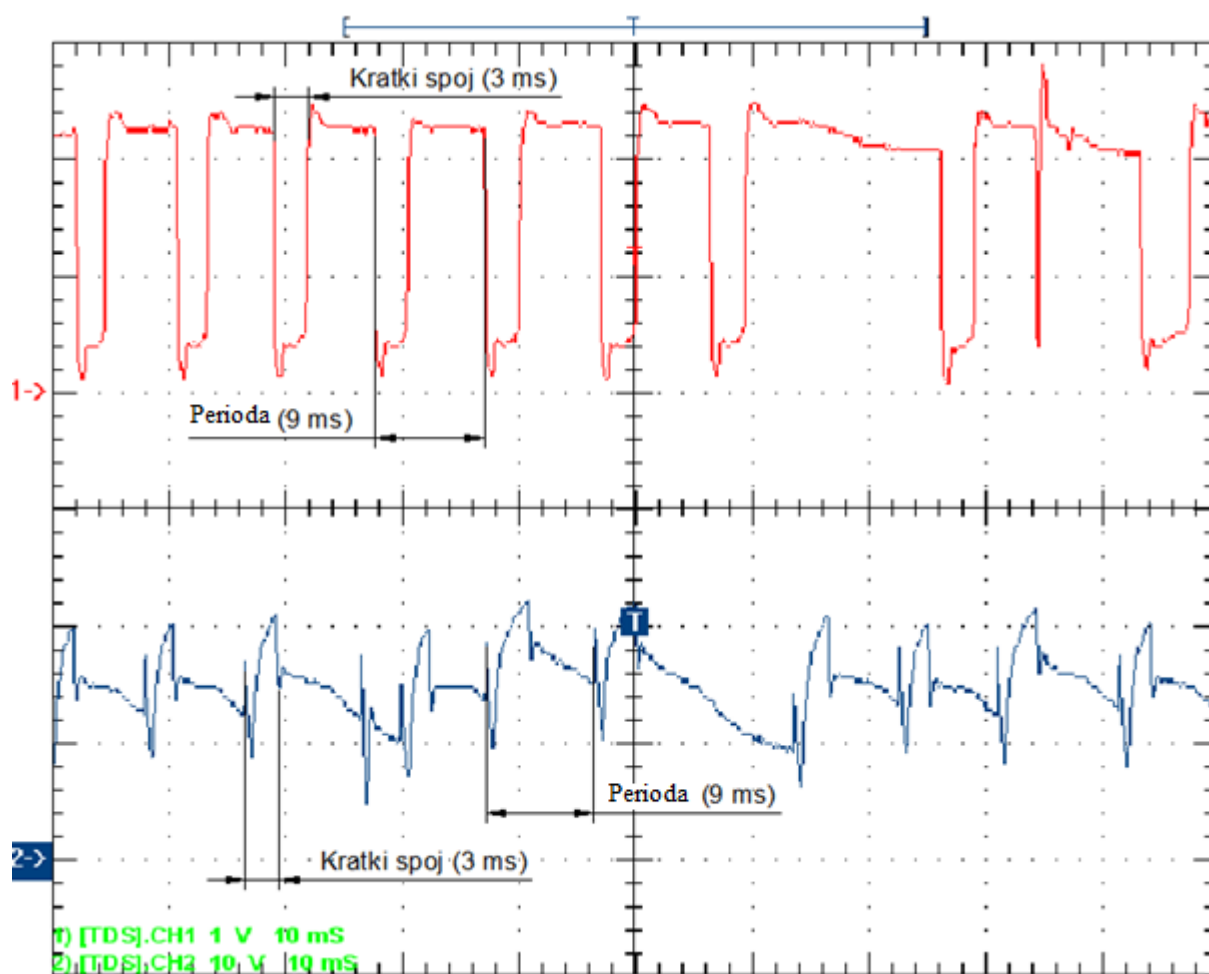


Slika 44. Navari 1 i 2 dobiveni pri snimanju dinamičkih karakteristika funkcije Constant penetration



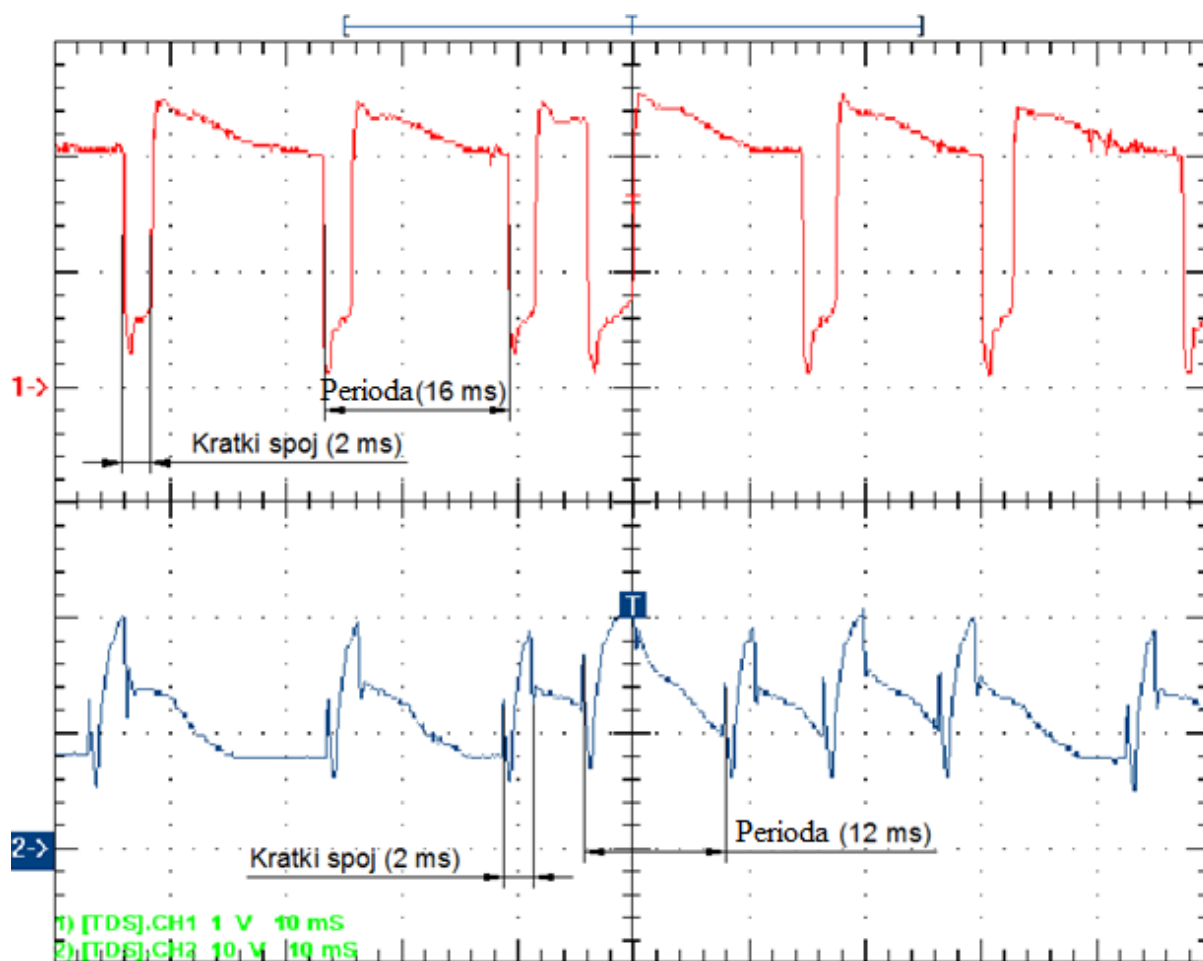
Slika 45. Navari 6 i 7 dobiveni pri snimanju dinamičkih karakteristika funkcije Constant penetration

Iz Slika 44. i 45. vidljivo je da su navari, izgledom, vrlo slični, podjednake širine, bez pretjeranog štrcanja iz čega se može zaključiti da su sva četiri procesa vrlo stabilna. Slike 46., 47. i 48. prikazuju snimljene oscilogramе dinamičke karakteristike struje i napona pri navarivanju uz korištenje funkcije Constant penetration. Slika 46. odnosi se na dinamičku karakteristiku dobivenu uz uključenu funkciju Control penetration (navar oznake 2) uz iznos slobodnog kraja žice od 15 mm. Slika 47. odnosi se na dinamičku karakteristiku dobivenu bez upotrebe funkcije Constant penetration (navar oznake 6) uz slobodni kraj žice od 30 mm. Slika 48. odnosi se na dinamičku karakteristiku dobivenu uz uključenu funkciju Constant penetration (navar oznake 7) uz slobodni kraj žice od 30 mm. Dinamička karakteristika struje i napona referentnog navara prikazana je na Slici 39.



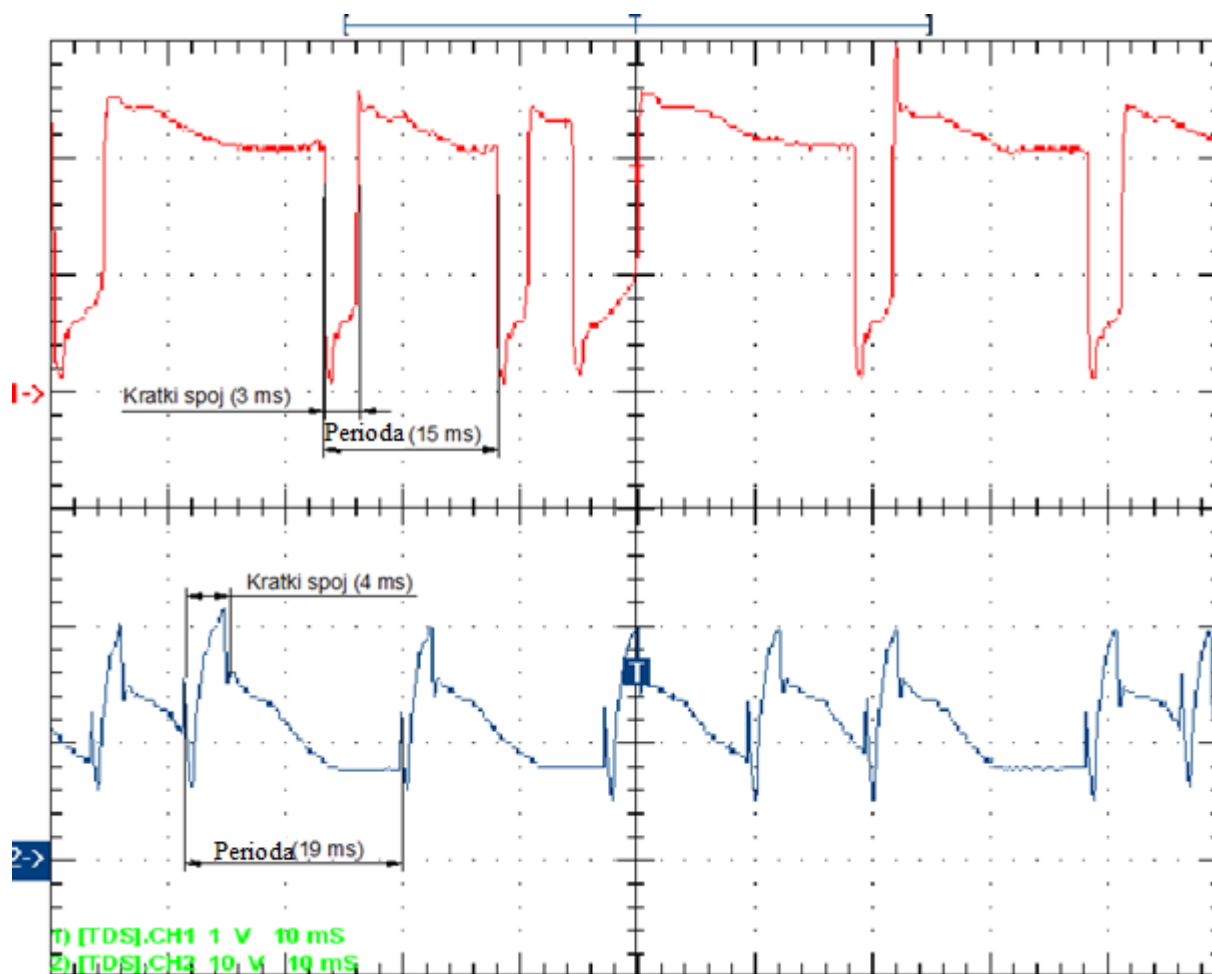
Slika 46. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i = f(t)$, pri MAG zavarivanju uz uključenu funkciju Constant penetration uz slobodni kraj žice od 15 mm

Iz Slike 46. vidljivo je da su vremena trajanja perioda (9 ms) i kratkog spoja (3 ms) ista kao i kod konvencionalnog MAG postupka bez uključene funkcije Constant penetration uz istu duljinu slobodnog kraja žice (Slika 39.), što je i logično s obzirom da su postavljeni parametri zavarivanja optimalno podešeni. Periode su stabilne i razmaci između njih su pravilni što upućuje na to da je proces stabilan.



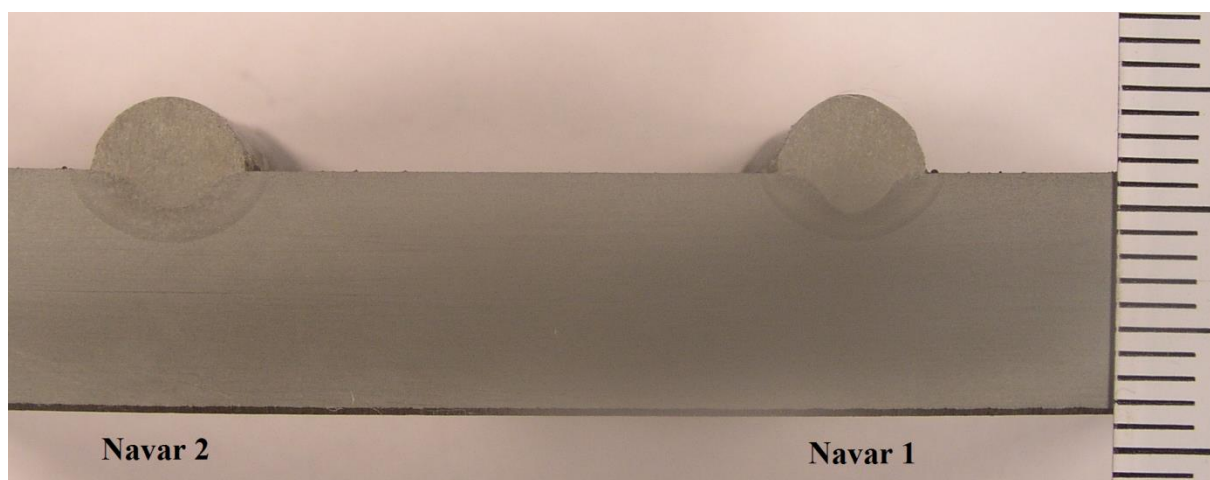
Slika 47. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i = f(t)$, pri MAG zavarivanju uz isključenu funkciju Constant penetration uz slobodni kraj žice od 30 mm

Iz Slike 47. vidljivo je da je povećanje iznosa slobodnog kraja žice s 15 mm na 30 mm, dovelo do pojave nestabilnosti električnog luka pri zavarivanju. Vidljivo je da su se vremena trajanja perioda i kratkog spoja promijenila. Vrijeme trajanja kratkog spoja (2 ms) smanjilo se u odnosu na referenti slučaj (3 ms). Trajanje perioda se znatno povećalo (12-16 ms) u odnosu na referenti slučaj (9 ms) što za posljedicu ima neravnomjerni unos topline. Periode su nestabilne te su razmaci između njih nepravilni.

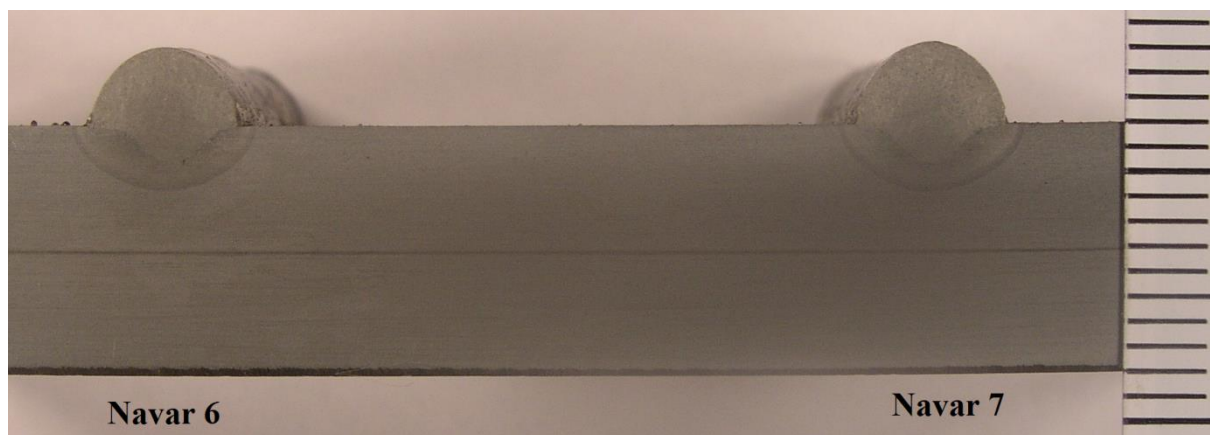


Slika 48. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i = f(t)$, pri MAG zavarivanju uz uključenu funkciju Constant penetration uz slobodni kraj žice od 30 mm

Iz Slike 48. vidljivo je, također kao i na Slici 47., da se trajanje kratkog spoja (4 ms) i perioda (15-19 ms) povećalo i da su periode nestabilne i razmaci između njih nepravilni. Također, vidljivo je da se trajanje perioda električnog luka (12-15 ms) povećalo tj. gorenje električnog luka se produljilo čime se povećao unos topline što omogućava održavanje konstantne dubine penetracije. Slike 49. i 50. prikazuje makroizbruske na kojima su vidljivi profili navara oznaka 1, 2, 6 i 7.



Slika 49. Makroizbrusak navara 1 i 2



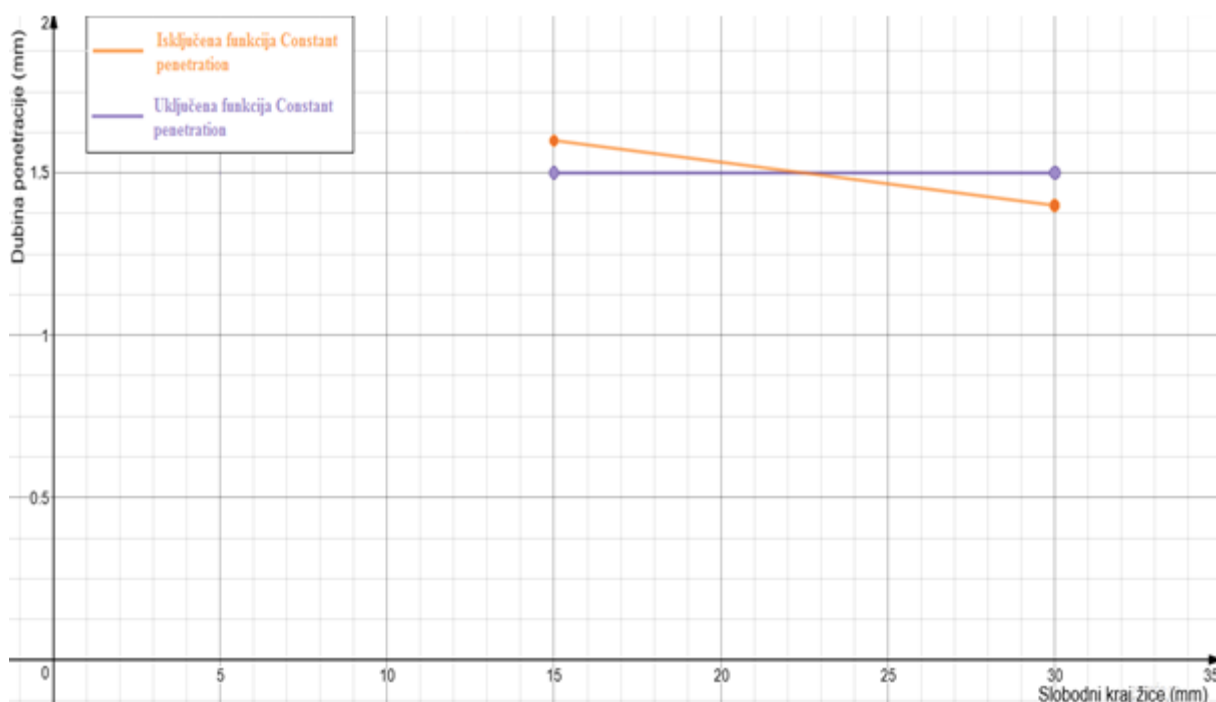
Slika 50. Makroizbrusak navara 6 i 7

Na slikama 49. i 50. vidljivo je da su profili navara, izgledom, podjednaki. Makroizbrusci na Slikama 49. i 50. analizirani su pomoću programa ImageJ te su rezultati mjerenja prikazani u Tablici 9.

Tablica 9. Izmjerene vrijednosti profila navara 1, 2, 6 i 7

Oznaka navara	Širina navara, mm	Dubina penetracije, mm	Nadvišenje navara, mm
1	6,1	1,6	3,3
2	6,3	1,5	3,0
6	6,1	1,4	3,1
7	6,0	1,5	3,3

Iz Tablice 9. vidljivo je da se povećanjem iznosa slobodnog kraja žice, uz isključenu funkciju Constant penetration, penetracija smanjila, dok je uz uključenu funkciju Constant penetration ostala konstantna bez obzira na promjenu iznosa slobodnog kraja žice. Također, vidljive su promjene u geometriji zavora (nadvišenje i širina) kod navara 2 i 6 kod kojih je funkcija Constant penetration bila uključena. Unatoč tome, ova funkcija se pokazala zadovoljavajućom tj. omogućila je konstantnu penetraciju bez obzira na promjenu iznosa slobodnog kraja žice. Na Slici 51. grafički je prikazana ovisnost dubine penetracije o iznosu slobodnog kraja žice pri navarivanju uz isključenu i pri navarivanju uz uključenu funkciju Constant penetration.



Slika 51. Ovisnost dubine penetracije o iznosu slobodnog kraja žice

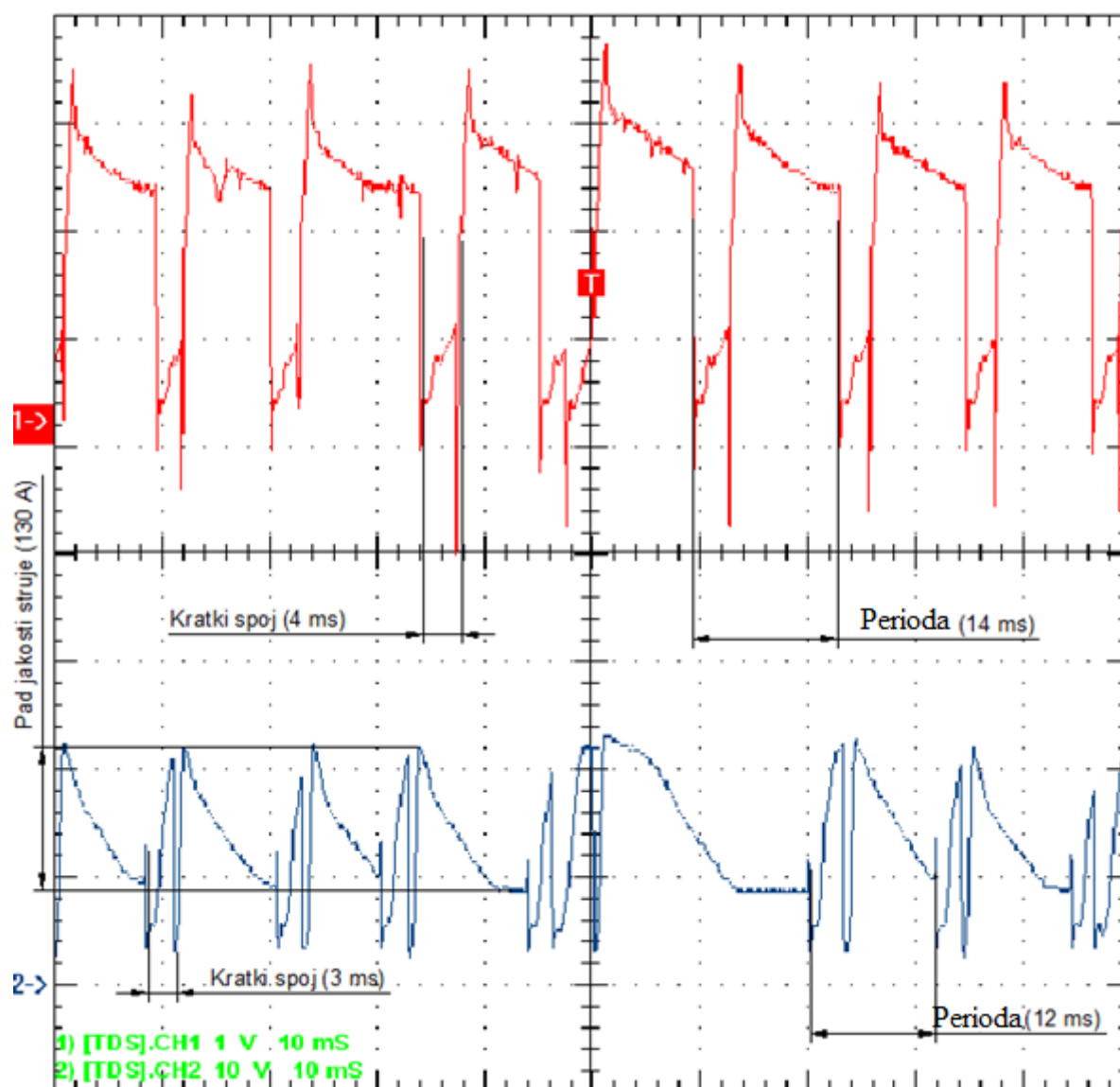
5.5. Analiza funkcije Low spatter

Funkcija Low spatter je posljednja od specifičnih funkcija izvora struje za zavarivanje, OTC Daihen Welbee P500L, koja je analizirana u eksperimentalnom radu. Low spatter je funkcija koja omogućava CBT modificirani način prijenosa metala u električnom luku. CBT postupak detaljnije je analiziran u poglavlju 4.1.4. CBT- Controlled bridge transfer®. Dinamičke karakteristike za analizu ove specifične funkcije snimane su tijekom navarivanja u zaštitnoj atmosferi plina s 82% argona i 18% CO₂ čiji je protok iznosio 18 l/min. Navarivalo se neutralnom tehnikom pri konstantnoj brzini navarivanja od 26 cm/min. Slobodni kraj žice iznosio je 15 mm. Navar oznake 8 je navar dobiven konvencionalnim MAG postupkom, prijenosom metala kratkim spojevima te služi kao referentni uzorak za procjenu mogućnosti ove specifične funkcije. Tablica 10. prikazuje promjenjive parametre zavarivanja pri snimanju dinamičkih karakteristika funkcije Low spatter.

Tablica 10. Parametri zavarivanja pri snimanju dinamičkih karakteristika funkcije Low spatter

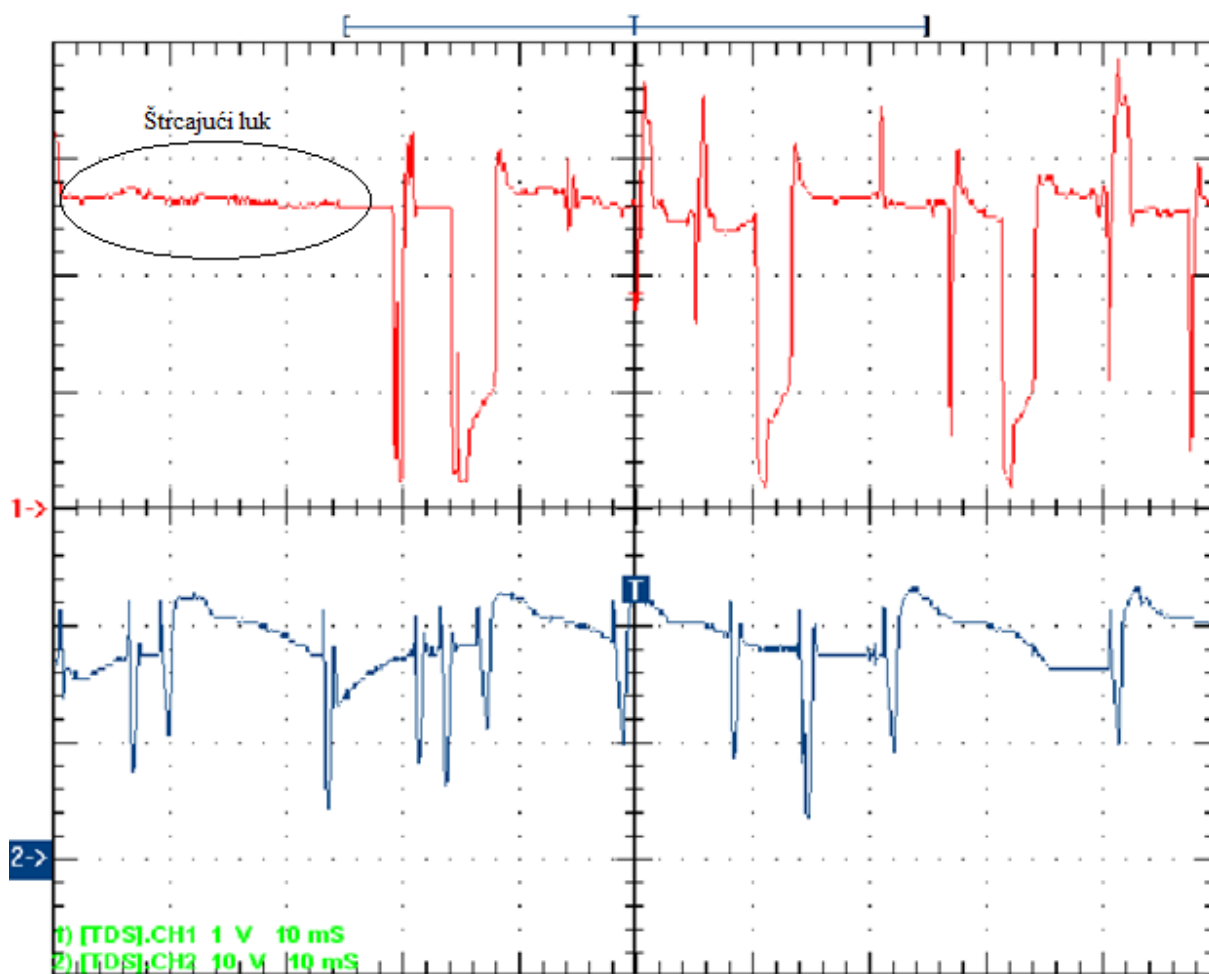
Oznaka navara	Podešene vrijednosti (prije navarivanja)			Očitane vrijednosti (tijekom navarivanja)		Način prijenosa metala
	Jakost struje zavarivanja, A	Napon, V	Brzina dodavanja žice, m/min	Jakost struje zavarivanja, A	Napon, V	
8	150	17	3,5	148	16,8	klasično
9	150	16,5	3,5	140	17,4	CBT
10	220	21,2	6,0	208	18,3	klasično
11	220	19,7	6,0	215	20	CBT

Slike 52., 53. i 54. prikazuju snimljene oscilograme dinamičke karakteristike struje i napona pri navarivanju uz korištenje funkcije Low spatter. Dinamička karakteristika struje i napona referentnog navara prikazana je na Slici 39.



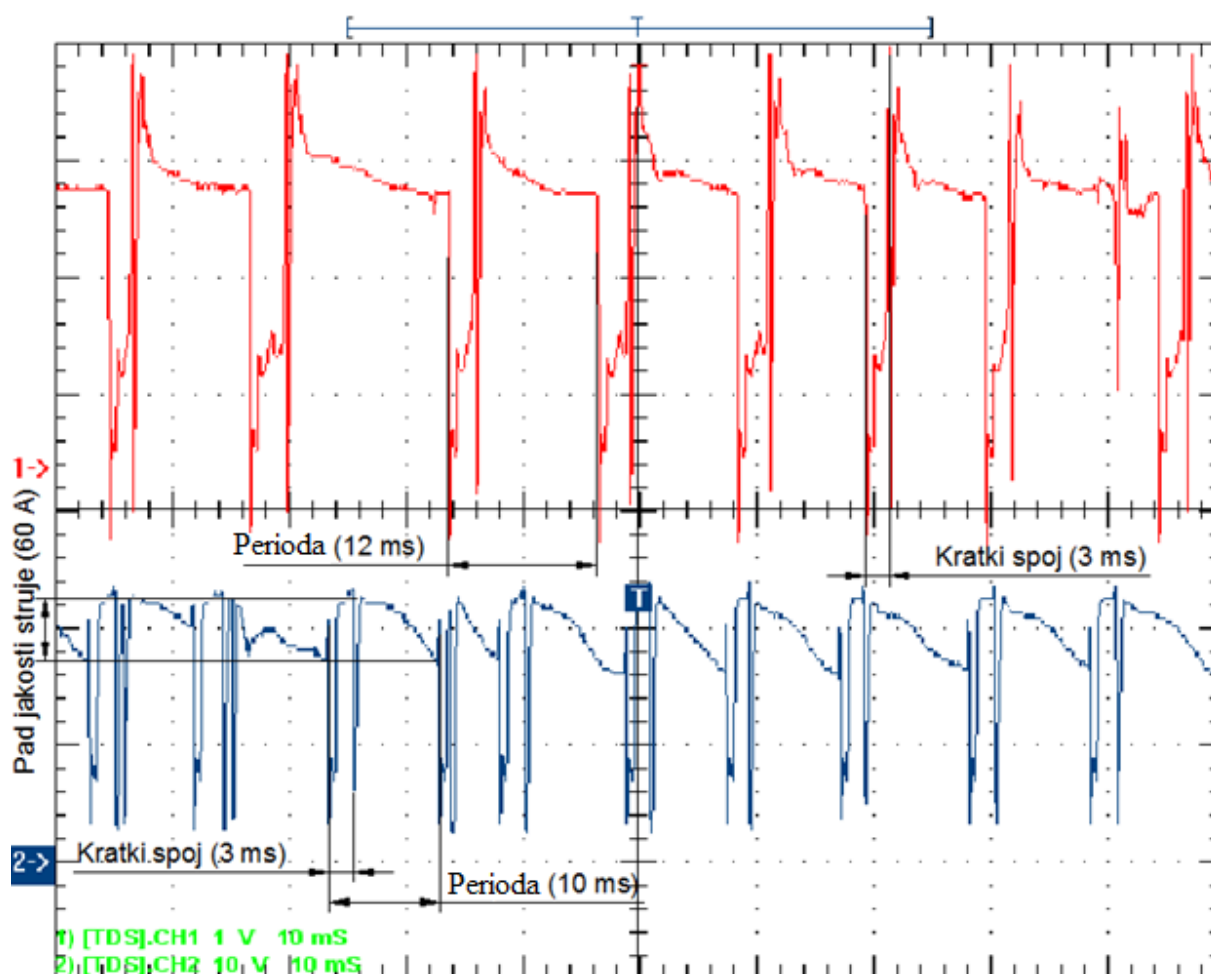
Slika 52. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i = f(t)$, pri CBT prijenosu metala pri jakosti struje zavarivanja od 150 A

Na Slici 52. prikazana je dinamička karakteristika struje i napona za CBT način prijenosa metala pri jakosti struje zavarivanja od 150 A. Vidljiva je prepoznatljiva dinamička karakteristika struje karakteristična za CBT način prijenosa metala. Također vidljivo je da su periode prilično stabilne i da su razmaci između njih pravilni. Na slici je, uz označena vremena trajanja periode (12-14 ms) i kratkog spoja (3-4 ms), označen i pad jakosti struje zavarivanja (130 A) na nominalnu vrijednost tijekom perioda električnog luka. U odnosu na referenti slučaj prikazan na Slici 39. vidljivo je da se trajanje kratkog spoja i trajanje perioda električnog luka produžilo.



Slika 53. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i = f(t)$, pri konvencionalnom MAG zavarivanju pri jakosti struje zavarivanja od 220 A

Na Slici 53. prikazana je dinamička karakteristika struje i napona pri konvencionalnom MAG zavarivanju pri jakosti struje od 220 A. Na slici je vidljivo da je proces kombinacija prijenosa metala kratkim spojevima i štrcajućeg luka tj. da se nalazimo u području prijelaznog luka. Periode su nestabilne i razmaci između njih nisu pravilni. U ovom području električni luk je vrlo nestabilan i povećano je štrcanje.



Slika 54. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i = f(t)$, pri CBT prijenosu metala pri jakosti struje zavarivanja od 220 A

Na Slici 54. prikazana je dinamička karakteristika struje i napona za CBT način prijenosa metala pri jakosti struje zavarivanja od 220 A. U odnosu na CBT prijenos metala pri jakosti struje zavarivanja od 150 A (Slika 52.) vidljivo je da se vremena trajanja kratkog spoja (3 ms) i vremena trajanja perioda (10-12 ms) nisu znatno promijenila što dovodi do zaključka da ova funkcija proširuje područje stabilnosti električnog luka i omogućava stabilan električni luk pri višim strujama zavarivanja. Vidljivo je da su periode stabilne i da su razmaci između njih pravilni. CBT način prijenosa metala pri strujama višim od 220 A, za postavljene parametre, postaje nestabilan tako da se tijekom eksperimenta granica od 220 A postavila kao granica do koje je funkcija Low spatter upotrebljiva.

6. ZAKLJUČAK

Poboljšanje kvalitete proizvoda, povećanje produktivnosti i smanjenje troškova nastoji se postići smanjenjem utjecaja ili eliminacijom nedostataka koje pojedini postupci zavarivanja imaju. U MAG zavarivanju nastoje se ukloniti nedostaci prijenosa metala kratkim spojevima i prijenosa metala štrcajućim lukom jer su ti načini prijenosa metala u električnom luku najzastupljeniji u praksi. Upravo razvojem modernih izvora struje za MAG zavarivanje te mnogobrojnih funkcija koje isti posjeduju, omogućene su modifikacije konvencionalnih načina prijenosa metala u električnom luku što je temelj za razvoj mnogih modificiranih postupaka MAG zavarivanja. Unatoč velikom broju modificiranih postupaka MAG zavarivanja i velikom broju razvijenih funkcija modernih izvora struje za MAG zavarivanje sva poboljšanja se fokusiraju na smanjenje ili eliminaciju štrcanja, povećanje penetracije i povećanje stabilnosti prijenosa metala u električnom luku.

Može se zaključiti da mogućnost podešavanja parametara zavarivanja pomoću sinergijskih krivulja uvelike olakšava postupak zavarivanja. Ovo poboljšanje izvora struje za zavarivanje omogućilo je, uz postavljanje jednog parametra zavarivanja (npr. jakost struje/brzina dodavanja žice), jednostavno, automatsko podešavanje svih ostalih parametara zavarivanja.

Analizom dinamičkih karakteristika određenih specifičnih funkcija i analizom makroizbrusaka dobivenih korištenjem istih tih funkcija, u eksperimentalnom radu, analiziran je utjecaj pojedine funkcije na prethodno navedene fokuse poboljšanja MAG postupka zavarivanja.

Analizom funkcije Arc control potvrđen je utjecaj induktiviteta na promjenu brzine porasta jakosti struje. To je jasno vidljivo na dinamičkim karakteristikama snimljenim tijekom navarivanja korištenjem ove funkcije. Također, može se zaključiti da je proces nestabilan pri vrijednostima funkcije Arc control od ± 10 . Analizom makroizbrusaka navara, dobivenih korištenjem ove funkcije, vidljiva su poprilična odstupanja u geometriji navara što upućuje na to da se podešavanjem vrijednosti ove funkcije može utjecati na geometriju zavara/navara, ovisno o tome što trebamo postići. Može se zaključiti da korištenjem funkcije Arc control dubina penetracije opada. Za bolju analizu i razumijevanje ove funkcije potrebno je izvršiti više ispitivanja i snimanja dinamičkih karakteristika pri različitim vrijednostima funkcije, a ne samo pri maksimalnoj pozitivnoj i maksimalnoj negativnoj vrijednosti. Također, može se

zaključiti da je inicijalna vrijednost ove funkcije na izvoru struje za zavarivanje optimalno podešena.

Analiza funkcije Constant penetration pokazala je da ova funkcija omogućava konstantan iznos dubine penetracije bez obzira na iznos slobodnog kraja žice. To je omogućeno dodatnom regulacijom brzine dodavanja žice. Iako su profili navara različiti kod slobodnog kraja žice od 15 mm i 30 mm, uz uključenu funkciju Constant penetration, penetracija je konstantna. Vidljiv je pad stabilnosti električnog luka, no to je logično s obzirom da se iznos slobodnog kraja žice povećao dvostruko. Može se zaključiti da ova funkcija, u rasponu vrijednosti slobodnog kraja žice korištenog u eksperimentalnom radu, ispunjava svoju svrhu.

Analiza funkcije Low spatter pokazala je da se radi o funkciji koja je temelj CBT postupka zavarivanja. Na snimljenim dinamičkim karakteristikama vidljiv je karakteristični oblik strujne karakteristike kod ovog postupka zavarivanja. Jasno je vidljiv pad jakosti struje zavarivanja odmah nakon kratkog spoja tj. neposredno prije ponovne uspostave električnog luka, čime se postiže bolja stabilnost prijenosa metala u električnom luku i smanjenje štrcanja. Može se zaključiti da ova funkcija proširuje područje kratkog spoja te osigurava stabilnost procesa pri većim strujama zavarivanja. Također, iz eksperimentalnog rada se može zaključiti da je CBT postupak, uz parametre zavarivanja navedene u radu, korišteni zaštitni plin i korišteni promjer dodatnog materijala, stabilan pri jakostima struje zavarivanja do 220 A.

Na temelju svih provedenih analiza moguće je zaključiti da specifične funkcije izvora struje za zavarivanje pridonose smanjenju utjecaja ili eliminaciji nedostataka MAG postupka zavarivanja. Također, može se zaključiti da analizirane funkcije imaju i svojih ograničenja. Upravo će se daljnji razvoj izvora struje za zavarivanje, funkcija koje oni posjeduju i modificiranih postupaka MAG zavarivanja fokusirati na eliminaciju tih ograničenja da bi se još više poboljšala stabilnost električnog luka, povećala penetracija i smanjilo štrcanje, u širem rasponu parametara zavarivanja.

7. LITERATURA

- [1] J.Bilandžija: „Pregled i razvoj dodatnih materijala za MAG zavarivanje“, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [2] N.Babić: „Analiza dinamičke karakteristike MAG CBT zavarivanja“, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [3] Garašić.I.; Kožuh.Z.: Priručnik iz kolegija Strojevi i oprema za zavarivanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [4][http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable MIGGMAWWires-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf](http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWWires-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf), dostupno na dan 24.05.2016.
- [5] M.Bajs: „Primjena i specifičnosti modificiranih MAG postupaka“, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [6]<http://pdf.directindustry.com/pdf/esab/pulsed-mig-welding/18224-84894.html>, dostupno na dan 24.05.2016.
- [7] D.Dzelnitzki: „Prednosti visokoučinskog MAG zavarivanja“, Zavarivanje vol.55, pp. 15.-21., siječanj-travanj, 2012.
- [8]<https://www.ewm-group.com/en/service/downloads/technical-papers/migmag-welding/820-highspeed-welding-a-mag-high-performance-process-with-a-future/download.html>, dostupno na dan 24.05.2016.
- [9]<http://www.lincolnelectric.com/en-us/support/process-and-theory/Pages/inverter-based-power-detail.aspx>, dostupno na dan 24.05.2016.
- [10]<http://www.lincolnelectric.com/en-us/support/process-and-theory/Pages/inverter-power-detail.aspx>, dostupno na dan 24.05.2016.
- [11] L.Jeffus: Welding: Principles and Applications 7th Edition, Cengage Learning, USA, 2012.
- [12]<http://www.manualslib.com/manual/915264/Kemppi-Kempact.html>, dostupno na dan 24.05.2016.

- [13] http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-B1A06881-29C7E8E2/fronius_poland/Leaflet_TS_TPS_3200_9000_M_06_0170_EN_0214_aw20_low_46394_snapshot.pdf, dostupno na dan 24.05.2016.
- [14] <http://www.kemppi.com/en-US/>
- [15] <https://www.rapidwelding.com/files/Kemppi%20Wise,Match%20Software%20Manual.pdf>, dostupno na dan 24.05.2016.
- [16] https://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-223EB606-89D9E304/fronius_international/Leaflet_LSC_HR_412187_snapshot.pdf, dostupno na dan 24.05.2016.
- [17] <https://www.fronius.com/>
- [18] http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-BBF1EF32-82E0BBF5/fronius_uk/PMC_LSC_processes_pres_openhouse_538968_snapshot.pdf, dostupno na dan 24.05.2016.
- [19] <http://www.lincolnelectric.com/assets/US/EN/literature/NX220.pdf>, dostupno na dan 24.05.2016.
- [20] M.Princip: „Određivanje pogodnosti MAG-STT postupka zavarivanja prilikom zavarivanja nehrđajućih čelika“, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [21] I.Herak: „Primjena i specifičnosti MAG-STT postupka zavarivanja“, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2008.
- [22] T.M.V-B.Rosado: „Innovation in the MIG/MAG Process: Productivity analysis and Fume Emissions“, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2007.
- [23] K.Himmelbauer: „Postupak CMT-novo u zavarivačkoj tehnologiji“, Zavarivanje vol.51, pp. 115.-121., svibanj-kolovoz, 2008.
- [24] I.Garašić, Z.Kožuh, M.Remenar: „Analiza prijenosa metala pri MAG CBT zavarivanju“, Zavarivanje vol.57, pp. 85.-93., svibanj-kolovoz, 2014.
- [25] <http://www.ess-welding.com/en/ess/news.php?cid=25>

- [26] <https://www.ewm-group.com/en/service/downloads/technical-papers/migmag-welding/825-ewm-forcearc-a-powerful-tool-for-migmag-welding/download.html>, dostupno na dan 24.05.2016.
- [27] B.Budig: „EWM-forceArc: Novi koncept prijenosa za MIG/MAG zavarivanje“, Zavarivanje vol.55, pp. 21.-27., siječanj-travanj, 2012.
- [28] <http://www.lincolnelectric.com/assets/US/EN/literature/NX260.pdf>, dostupno na dan 24.05.2016.
- [29] <http://www.otc-daihen.de/index.php?id=2333>, dostupno na dan 01.06.2016.
- [30] V.Kuzman: „Dinamička karakteristika izvora struje modificiranih uređaja za MIG/MAG zavarivanje“, Seminarski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [31] <https://www.red-d-arc.com/pdf/Bug-O%20Systems%20MDS%20Spec%20Sheet.pdf>, dostupno na dan 01.06.2016.
- [32] <http://www.b2bmetal.eu/en/pages/index/index/id/141/>, dostupno na dan 06.06.2016.
- [33] <http://www.ezg.hr/proizvodi/wire/EZSG2.html> , dostupno na dan 07.06.2016.

8. PRILOZI

1. CD-R disc – pdf verzija diplomskog rada.